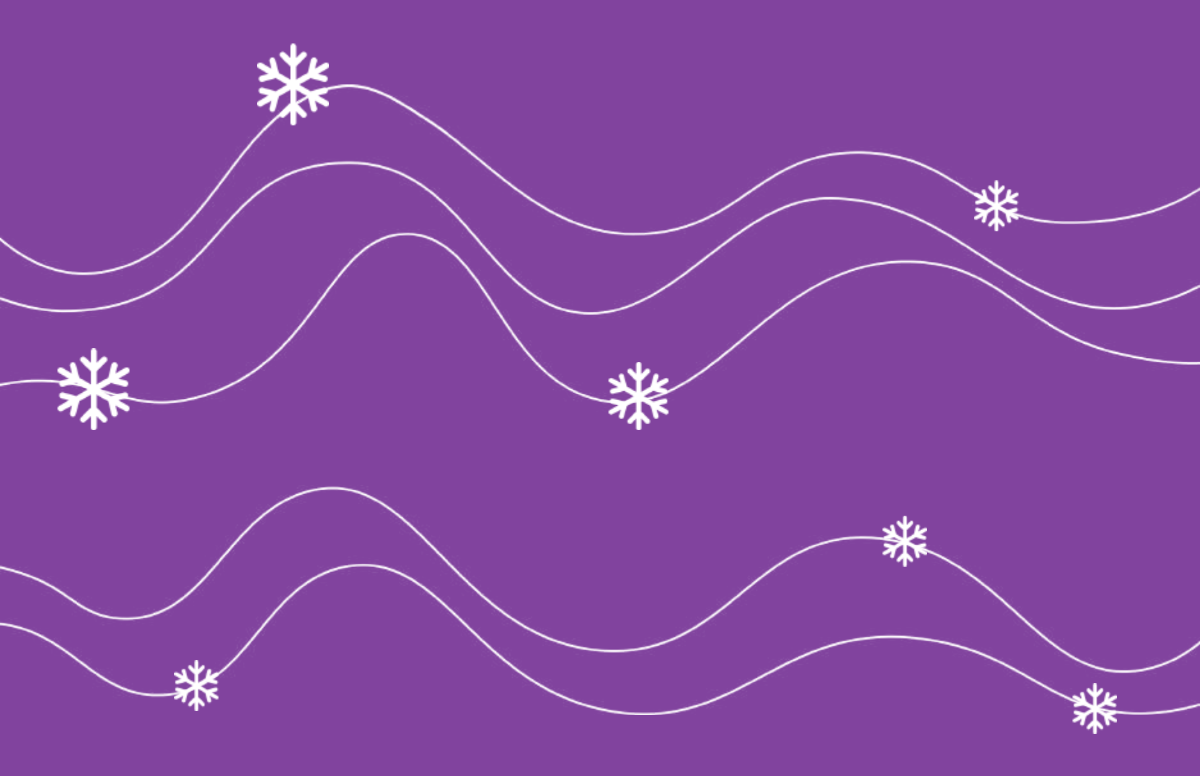
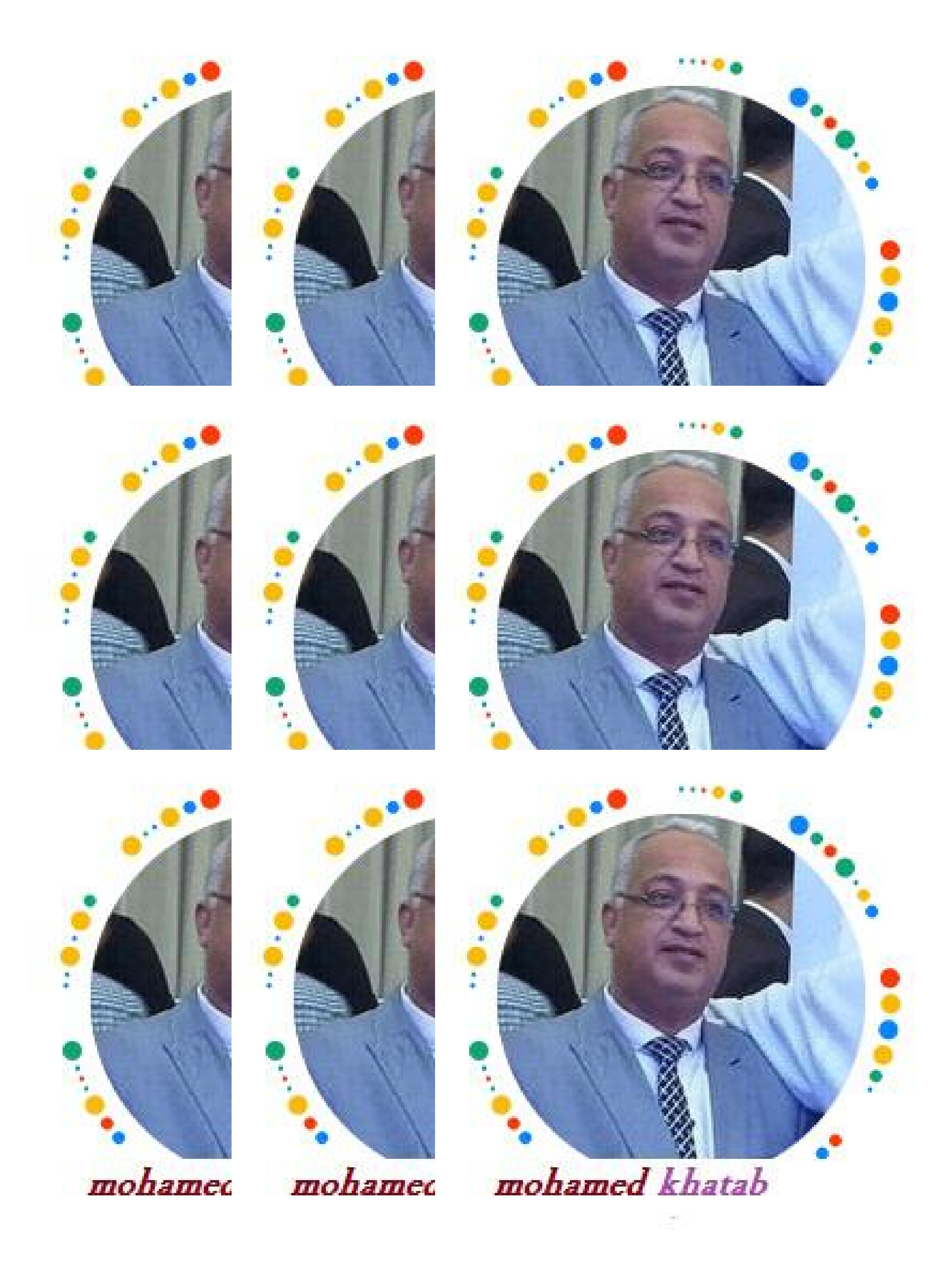
سبعة أعمدة للعلم

خفة الثلج المذهلة ومفاجآت علمية أخرى

جون جريبين



ترجمة رشا صلاح الدخاخني


mohamed khatab

سبعة أعمدة للعلم

خفة الثلج المذهلة ومفاجآت علمية أخرى

تأليف
جون جريبين

ترجمة
رشا صلاح الدخاخني

مراجعة
شيماء طه الريدي



سبعة أعمدة للعلم

جون جريبين

Seven Pillars of Science

John Gribbin

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٣ ٢٨٢٧ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٢٠.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٢.

المحتويات

إشادة بكتاب ستة أشياء مستحيلة

«كتاب تمهيدي عن كل ما يتعلَّق بالكمِّ ... يمتاز بالدقة وسلاسة الأسلوب.»

صحيفة صنداي تايمز

«ألهم جريبين أجيالًا بمؤلَّفاته في العلوم المبسَّطة، وهذا الكتاب، الذي يُعَد أحدث مؤلَّفاته، هو ملخَّص موجز وممتع للمتبارين الأساسيين في تقديم تفسير حقيقي لميكانيكا الكم. ... إن لم تَنْتَبْك الحيرة من قبلُ حول ما ترمي إليه أنجح نظرياتنا العلمية، أو حتى إن سبق وانتابتك تلك الحيرة وتريد أن تعرف آخر ما توصَّل إليه الفكر، فسيُقدِّم لك هذا الكتاب الجديد كل المعلومات التي سبقت انهيار الدالة الموجية.»

جيم الخليلي

«يقدِّم لنا جريبين وجبةً دسمةً من المعلومات تتسم بالدقة والوضوح؛ إذ يزخر هذا الكتاب على صغره بكمٍّ هائل من المعلومات. يضم الكتاب بين دفَّتَيه كمًّا عظيمًا من كتب العلوم المبسطة، وأنا أحبه. ... يمكن القول إن هذا الكتاب هو أفضل وأعظم ما أنتجت العلوم المبسَّطة البريطانية؛ لأنه يوجز نتاج سنوات عديدة من الدراسة في طبيعة فيزياء الكم في كُتيب صغير.»

برايان كليج، popularscience.co.uk

«كتاب رائع وسهل الفهم ... أنصح به بقوة لطلاب العلوم والمتحمِّسين للخيال العلمي، وكذلك أي شخص لديه فضول لفهم العالم الغريب لفيزياء الكم.»

مجلة فوربس

شكر وتقدير

أود أن أُعرب عن امتناني لمؤسَّسة ألفريد سي مونجر لتقديمها الدعم المالي أثناء تأليفي هذا الكتاب، كما أتقدَّم بالشكر إلى جامعة ساسكس على توفير المقر والمرافق البحثية.

وكما هو الحال في جميع كتبي، حرصَت ماري جريبين على ألَّا أحيد بعيدًا وأهيم وسط أدغال الغموض. أمَّا باقي المآخذ فأنا المسئول عنها.

الْحِكْمَةُ بَنَتْ بَيْتَهَا. ونَحَتَتْ أَعْمِدَتَهَا السَّبْعَةَ.

سِفر الأمثال ٩:١

تمهيد

سبعة أعمدة للعلم

اشتُهر جيه بي إس هولدين بوصفه للمراحل الأربع لقَبول الأفكار العلمية، وجاء وصفه كما يلي:

(١) هذا هراء لا قيمة له؛
(٢) هذه وجهة نظر شيِّقة ولكنها حمقاء؛
(٣) هذا صحيح، ولكن غير مهم على الإطلاق؛
(٤) كثيرًا ما قلت ذلك.

كلما أنعمتُ النظر في تاريخ العلوم، وكلما قضيتُ وقتًا أطول في ملاحظة التطوُّر المستمر لمسيرة العلم، زاد تقديري لحقيقة هذه الحكمة. فعند استرجاع الماضي، من السهل أن ترى كيف صارت الأفكار، التي كانت يومًا ما موضع استنكار وسخط، حقائق مقبولة، ومن السهل أن ينتابك شعور بالتفوُّق والأفضلية على أولئك البسطاء الذين كانوا يظنون، مثلًا، أن الأرض مسطَّحة. ولكن حتى على مدار حياتي الخاصة، رأيت أفكارًا كانت تُعتبر فيما مضى تخمينات شاذة — من بينها نظرية الانفجار الكبير لتفسير نشأة الكون والكيانات الكمومية غير الموضعية — تحوَّلَت إلى حكمة مُسلَّم بها وأعمدة للعلم؛ في حين أن البدائل الأكثر «عقلانية» — مثل نظرية الحالة الثابتة (أو نظرية الكون اللامتناهي)، تلك الفكرة القائلة إن ما يحدث في مكان ما لا يمكن أن يؤثِّر في الحال على ما يحدث في مكان بعيد —

تساقطت على جانبي طريق التقدُّم. والآلية التي يقوم عليها العلم رائعة بنفس قدر روعة العلوم ذاتها، ولكي أوضِّح لك ذلك عمليًّا قمت باختيار سبعة أمثلة، كانت مثيرةً في زمنها، صارت إمَّا أعمدةً للحكمة العلمية أو في طريقها نحو المرور بمراحل هولدين الأربع لقَبولها. ولكي أُلزم نفسي بسبعة أمثلة فقط، كنت بحاجة إلى موضوعٍ عام يربط بينها؛ ولهذا اخترت سمات للكون ترتبط ارتباطًا وثيقًا بوجودنا، وباحتمالية وجود حياة في مكان آخر. فهذا، على أي حال، هو أهم جوانب العلم فيما يتعلَّق بنا كبشر.

بعض هذه الأمثلة تُعَد بالفعل من أعمدة العلم، والبعض الآخر ربما يُعَد في طور مبكِّر؛ سأترك لك المجال لتحكم بنفسك. وعلى الرغم من أن جميعها كانت أفكارًا مدهشةً ومثيرةً في زمنها، وبعضها لا يزال كذلك، فإن من السِّمات الأساسية لتطوُّر العلوم: الرغبة في التفكير فيما لا يمكن تصوُّره، ثم اختبار تلك الأفكار، على نحوٍ حاسم، واكتشاف ما إذا كانت تمثِّل وصفًا جيدًا لما يحدث في العالم الحقيقي أم لا. ورغم ذلك، ثمة بعض الأفكار يستحيل تصنيفها، ويمكن إدراجها تحت أي مرحلة من مراحل هولدين، حسبما يتراءى لك من وجهة نظرك الشخصية. وأهم هذه الأفكار هو سؤال حيَّر الفلاسفة لوقت طويل جدًّا أطول من عمر العلم كما نعرفه الآن، وبهذا السؤال سأبدأ هذا الكتاب وأختتمه: هل نحن بمفردنا في هذا الكون؟

جون جريبين
نوفمبر ٢٠١٩

المقدمة

العوالم الأخرى: قد لا نكون بمفردنا في هذا الكون

الأرض كروية وتتحرَّك عبر الفضاء. كان هذا الاستنتاج إدراكًا مثيرًا تمَّ التوصُّل إليه قبل فترة زمنية لا تتعدَّى بضع مئات من السنين. وهي فكرة تتناقض تمامًا مع المنطق، لدرجة أن بعض الأشخاص ما زالوا لا يستطيعون قَبولها. قد لا تكون واحدًا من هؤلاء، ولكن هل صدَّقت هذه القصة لمجرَّد أن هذا هو ما قيل لك في صغرك، ولأن «الجميع يعرفون» أنه حقيقي، أم سبق لك أن استوقفك التفكير في مدى اعتبار هذه الفكرة مجنونة، من واقع خبرتك اليومية، وأخذ الأدلة بعين الاعتبار؟

لكي نرى مدى معقولية فكرة أن الأرض مسطحة، وإلى أي مدًى كانت فكرة كروية الأرض إدراكًا مثيرًا، يمكننا أن نعود بالتاريخ إلى عصر الفيلسوف اليوناني أناكساجوراس الأثيني، الذي عاش في القرن الخامس قبل الميلاد تقريبًا. لم يكُن أناكساجوراس أحمق. وإنما استند منطقه إلى أفضل الأدلة المتاحة له، وكان منطقه صحيحًا في ضوء هذه الحقائق. وقد تبيَّن عدم صحة استنتاجاته، ولكن الأهم من ذلك هو حقيقة أنه قد حاول فهم طبيعة الشمس باعتبارها كِيانًا ماديًّا، يخضع لنفس القوانين السارية على الأجسام الموجودة هنا على سطح الأرض. ولم يتعامل معها باعتبارها ظاهرةً خارقةً للطبيعة تفوق قدرة البشرية على الفهم.

كان الدافع وراء تخمينات أناكساجوراس هو سقوط حجر نيزكي ذات يوم في نهر إيجوسبوتامي. كان الحجر النيزكي ساخنًا؛ ومن ثم استنتج أنه أتى من الشمس حتمًا.

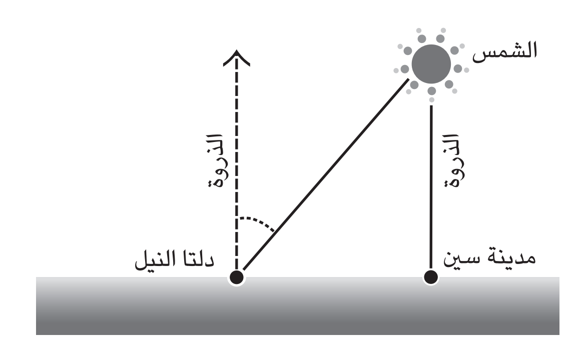
وكان يحتوي على عنصر الحديد؛ ولذا استنتج أن الشمس تتكوَّن حتمًا من الحديد؛ أي كرة ساخنة من الحديد تسير عبر السماء. كل هذا كان منطقيًّا تمامًا في ضوء المعرفة المتاحة له آنذاك. ولكن أثار هذا تساؤلَين مثيرَين للاهتمام شرع أناكساجوراس في الإجابة عنهما: كم يجب أن يبلغ حجم تلك الكرة الحديدية الساخنة، وكم تبلغ المسافة التي تفصلها عن سطح الأرض أثناء الحركة؟

لم يكُن أناكساجوراس كثير الترحال، ولكنه سمع روايات من أشخاص سافروا إلى دلتا النيل، وإلى أبعد من ذلك، وصولًا إلى الروافد العليا لنهر النيل. ذكرت هذه الروايات أنه في ذروة فترة الظهيرة أثناء الانقلاب الصيفي (أي «أطول أيام الصيف نهارًا»)، كانت الشمس عموديةً فوق مدينة تُدعى سين، بالقرب من الموقع الحالي للسد العالي بأسوان. لعلك صادفت هذه المعلومة الطريفة في سياق آخر، فإذا حدث ذلك، كن مستعدًّا للمفاجأة. عرف أناكساجوراس أيضًا أنه في ظهيرة أطول أيام الصيف نهارًا تبتعد الشمس بزاوية تبلغ ٧ درجات عن الوضع العمودي عند دلتا النيل. وعرف المسافة الفاصلة بين دلتا النيل ومدينة سين. ومع توافر هذه المعلومات، وبافتراض أن الأرض مسطحة، وبالاستعانة بعلم هندسة المثلَّثات ذات الزاوية القائمة، كان من السهل على أناكساجوراس أن يحسب ارتفاع الشمس في فترة الظهيرة أثناء الانقلاب الصيفي فوق رءوس سكان مدينة سين والذي قُدِّر بأربعة آلاف ميل تقريبًا (وفقًا لوحدات القياس المعاصرة). ونظرًا إلى أن الشمس تغطِّي نحو نصف درجة قوسية من السماء (تمامًا مثل القمر، وهي مصادَفة مثيرة خارج نطاق هذا الكتاب)، أوضحت له هندسة المثلَّثات أن قطر الشمس يبلغ حتمًا نحو ٣٥ ميلًا، ما يعادل تقريبًا نفس مساحة شبه جزيرة بيلوبنيز جنوب اليونان.

كان اقتراح أناكساجوراس باعتبار الشمس ظاهرةً طبيعيةً اقتراحًا صادمًا جدًّا بالنسبة إلى مواطنيه، لدرجة أنه أُلقي القبض عليه بتهمة الهرطقة، ونُفي إلى الأبد خارج مسقط رأسه بمدينة أثينا. وبعد مرور ما يربو على ألفَي عام، وتحديدًا في القرن السابع عشر ميلاديًّا، حاول مفكِّر آخر، وهو جاليليو جاليلي، أن يفسِّر الشمس كظاهرة طبيعية أيضًا، واتُّهم بالهرطقة كذلك.

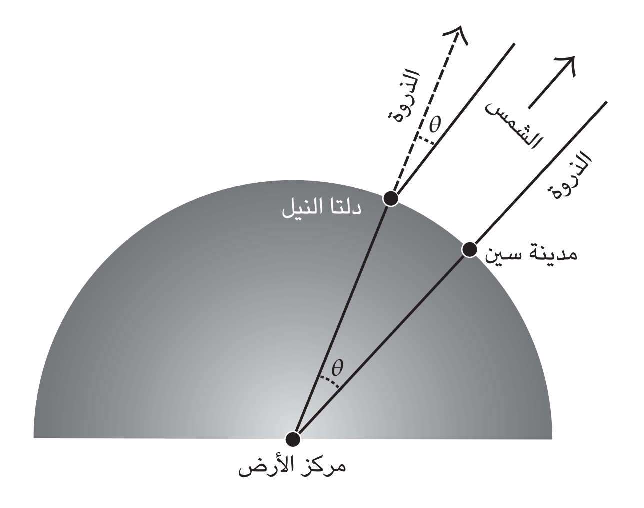
ولكن بعد مرور مائتَي عام فقط على افتراض أناكساجوراس، استعان فيلسوف يوناني آخر، يُدعى إراتوستينس، بالبيانات نفسها بالضبط لإجراء عملية حسابية مختلفة قليلًا. لعلك سمعت بهذه النسخة من القصة. فقد افترض إراتوستينس أن الأرض كروية، وخمَّن أن الشمس تبتعد عن الأرض بمسافة كبيرة لدرجة أن أشعة الشمس تصل إلى

الأرض عبر خطوط متوازية. وبهذا الافتراض، تكون زاوية السبع درجات التي قيست عموديًّا عند دلتا النيل هي نفس الزاوية المقابلة من عند سطح الأرض مضروبةً في المسافة بين الدلتا ومدينة سين، والتي قيست من عند مركز الأرض (انظر الرسم البياني في الصفحة التالية). وهذا يتيح لنا حساب نصف قطر الكرة الأرضية. ونظرًا إلى أن الزاوية واحدة، فإن «الإجابة» واحدة؛ أي ٤ آلاف ميل. ولكن هذا الرقم فُسِّر بكونه نصف قطر الكرة الأرضية، لا المسافة الفاصلة بين الشمس وسطح الأرض. ونظرًا إلى أن إراتوستينس كان «محقًّا»، كان تصوُّره هذا هو ما سُجِّل في الكتب المدرسية والحكايات الشعبية، بينما قوبل تصوُّر أناكساجوراس بالتجاهل. بيد أن العبرة ليست بمن هو المحق ومن المخطئ. فالنظريات الجيدة قائمة على الأدلة السليمة وتُقدِّم تكهُّنات يمكن إخضاعها للاختبارات. فإذا اجتازت النظرية هذه الاختبارات، يستمر العمل بها، وإذا فشلت في اجتيازها، يتم استبعادها. بالوضع في الاعتبار كلا التصورَين، نجد أن نظريتَي الفيلسوفَين اليونانيَّين (أو تحريًا للدقة، الفرضيتان، ولكن لن أتلاعب هنا بالمسمَّيات) تتحدان معًا لتخبرنا بأن الأرض إمَّا مسطحة والشمس تقع فوقها بنحو ٤٠٠٠ ميل، وإمَّا أن الأرض عبارة عن كرة يبلغ نصف قطرها ٤ آلاف ميل والشمس تبعد عنها بمسافة شاسعة ولكن مجهولة. وأتاحت لنا عمليات الرصد والقياسات اللاحقة تحديد أيهما أفضل لوصف العالم الحقيقي.



بافتراض أن الأرض مسطحة، يسهل حساب المسافة الفاصلة بينها وبين الشمس.

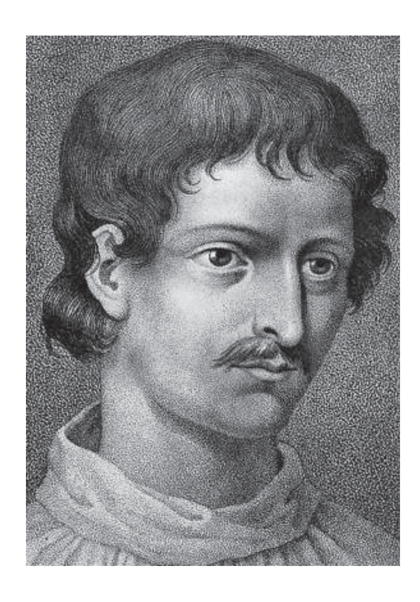
ثمة عبرة من هذه القصة أيضًا. فحتى المفكِّر الراديكالي البعيد النظر، الذي لم يكُن يخشى مواجهة السلطات في زمنه في خضم سعيه وراء الحقيقة، لم يستطِع أن يحرِّر



بافتراض أن الأرض كروية، تعطينا الملاحظة نفسها تقديرًا لنصف قطر الكوكب.

نفسه من التصوُّر المسبق بأن الأرض مسطحة. ولم يفكِّر أناكساجوراس مطلقًا في البدائل. وتاريخ العلوم يزخر بأمثلة مؤسفة مشابهة لأفكار قائمة على منطق لا تشوبه شائبة ودقة متناهية، ولكنها أفكار قائمة على إيمان مطلق لا جدال فيه بشيء تبيَّن أنه غير صحيح تمامًا. لا ينبغي أن يدور العلم حول الإيمان بمعتقد ما، بل يجب أن يدور حول التشكيك في المعتقدات الراسخة في الذهن. وهذا لا يضمن دومًا حياةً هادئة؛ إذ دفع جوردانو برونو تكلفة هذا الأمر. مع العلم بأن برونو يبدو أنه قد بذل قصارى جهده لجعل حياته صعبةً في مجملها، وليس في سبيل العلم فحسب.

كثيرًا ما يُرجِع المؤرِّخون (وأنا من بينهم) تاريخ بداية العلوم الحديثة إلى عام ١٥٤٣، العام الذي نُشر فيه كتاب بعنوان «عن دوران الأَجْرام السماوية» تأليف نيكولاس كوبرنيكس. ولكن في الحقيقة، لم يُحدِث الكتاب ضجةً آنذاك؛ إذ لم تلقَ الأفكار الواردة فيه رواجًا واسعًا لنحو مائة عام، ولم يُسهم كثيرًا في إزاحتنا عن مركز الكون. حافظ كوبرنيكس على فكرة وجود مركز ثابت للكون، بيد أنه نقل هذا المركز من الأرض إلى الشمس. فأوضح أن الحركة الظاهرية للنجوم عبر السماء تحدث بسبب دوران الأرض، إلا أنه تمسَّك بفكرة أن النجوم والكواكب مثبتة على أفلاك صلبة تتحرَّك حول الشمس. وكان مقترحه الأكثر «هرطقةً» هو اعتبار الأرض كوكبًا أيضًا، يدور حول الشمس مرةً واحدةً في السنة، ولكن كان هذا أقصى ما وصل إليه.



جوردانو برونو. «ساينس فوتو لايبراري».

عزم برونو على استكمال مسيرة كوبرنيكس. وُلد برونو بالقرب من مدينة نابولي الإيطالية في عام ١٥٤٨؛ أي بعد خمس سنوات من صدور كتاب كوبرنيكس الشهير «عن دورانِ الأَجْرام السماوية»، وسُمِّي باسم فيليبو، ثم الْتحق بسلك الرهبنة الدومينيكية في سن السابعة عشرة، متخذًا اسم جوردانو، ورُسِّم قسًّا رسميًّا في عام ١٥٧٢. وسرعان ما واجه صعوبات بسبب تفكيره المتحرِّر وميله إلى قراءة الكتب الممنوعة (أو على الأقل الكتب الخلافية). ويبدو أنه واجه مشكلةً خاصةً بسبب اعتناقه المذهب الآريوسي، وهو المعتقد القائل إن المسيح يحتل مرتبةً وُسطى بين بني البشر والرب؛ بمعنى أنه مقدَّس ولكن لا يرقى إلى منزلة الإله. وعندما احتدمت الأمور وخرجت عن السيطرة، فرَّ من نابولي هاربًا، وخلع الزي الديني، وبدأ سلسلةً من الأسفار أخذته إلى أماكن عدة من بينها جنيف وليون وتولوز، حيث حصل على درجة الدكتوراه في اللاهوت وألقى محاضرات في الفلسفة. وفي عام ١٥٨١، انتقل إلى باريس، حيث نعم بالأمان وحظي بحماية الملك هنري الثالث، ونشر عدة أعمال هناك.

في عام ١٥٨٣، سافر برونو إلى إنجلترا ومعه خطابات توصية من ملك فرنسا، وتقرَّب من دوائر البلاط الملكي الإليزابيثي حيث الْتقى بمشاهير مثل فيليب سيدني و(ربما)

جون دي. وعلى الرغم من أنه ألقى بعض المحاضرات في جامعة أكسفورد عن النموذج الكوبرنيكي للكون، لم يستطِع الحصول على منصبٍ بالجامعة، حيث كانت آراؤه المثيرة للجدل محل سخرية من جانب جون أندرهيل، الذي كان آنذاك يشغل منصب عميد كلية لينكولن، ثم منصب رئيس أساقفة كانتربري في وقت لاحق، والذي استهزأ ببرونو لاعتناقه «رأي كوبرنيكس القائل إن الأرض تدور، في حين تبقى السماء ثابتة؛ لكن في الحقيقة إن رأسه هو الذي يدور، بينما يظل عقله ساكنًا.»[١] ولكن يبدو أن شخصية برونو وكذلك معتقداته جعلته منبوذًا داخل حرم جامعة أكسفورد. يبدو أنه كان متغطرسًا، وعزف عن منح المزيد من الوقت لمن يراهم حمقى، واستطاع أن يُثير حفيظة الآخرين، حتى أولئك الذين يشاركونه الرأي.

ولكن كان هذا غيضًا من فيضِ ما أراد برونو تقديمه. ففي عام ١٥٨٤، نشر سلسلتَين من «حوارات» دعم فيها علم الكونيات الكوبرنيكي، وبحلول عام ١٥٨٨، كان يكتب أن الكون «لا نهائي ... وأبدي وغير محدود.» إذن، أين كانت النجوم؟ من خلال تجميع الأفكار التي أعرب عنها برونو في عدة مواضع، نجد أنه كان أول شخص يدرك أن النجوم ليست شموسًا أخرى، بل أدرك أنه ربما كان لكل منها عائلتها الخاصة من الكواكب، مثل الشمس نفسها. وهذه العوالم الأخرى، حسب قوله «ليست أقل سموًّا أو ذات طبيعة مختلفة عن كوكب الأرض الذي نعيش عليه»، ومن ثم ربما «تضم حيوانات وسكانًا.»

كان هذا كافيًا للزج به في مزيد من الصراعات مع السلطات الرومانية الكاثوليكية، وأحيانًا ما يُنظر إلى برونو باعتباره شهيدًا للعلم. بيد أن مشكلاته مع السلطة كانت عميقةً جدًّا، لدرجة أن هذه المعتقدات لا تتعدَّى في الواقع سوى كونها حاشيةً هامشيةً في قصة حياته فيما بعدُ ومصيره. ففي عام ١٥٨٥، وبسبب تدهور الوضع السياسي بين إنجلترا وفرنسا، عاد برونو إلى باريس، ومنها إلى ألمانيا وبراغ، حيث ذاع صيته (نظرًا إلى تحديه السلطات الكاثوليكية بالفعل) بعد أن عوقب بالحرمان الكنسي على أيدي اللوثريين. وفي عام ١٥٩١، انتهز الفرصة للعودة إلى إيطاليا، متوجِّهًا في البداية إلى مدينة بادوا على أمل الحصول على درجة الأستاذية. ولكن كان المنصب من نصيب جاليليو، فانتقل إلى مدينة البندقية، وهي الأكثر تحرُّرًا بين المدن-الدول الإيطالية. ولكن اتضح أنها ليست متحرِّرةً بالقدر الكافي. ففي يوم الثاني والعشرين من مايو عام ١٥٩٢، أُلقي القبض على برونو واتُّهم بالكفر والهرطقة، وكان اعتقاده بتعدُّدية العوالم مثالًا واحدًا من بين العديد من الأمثلة التي وردت في الاتهامات الموجَّهة إليه. ربما كان سيُفلت بعقوبة مخفَّفة نسبيًّا،

إلا أن محاكم التفتيش طالبت بوجوب نقله إلى روما ليبتُّوا في أمره، وفي النهاية رضخت السلطات في البندقية للضغوط وسلَّمته في فبراير عام ١٥٩٣.

استمرَّت محاكمة برونو سبع سنوات، على نحو متقطِّع، وفي هذه الأثناء كان مسجونًا في روما. فُقد العديد من الأوراق المتعلِّقة بالمحاكمة، بيد أن الاتهامات الموجَّهة إليه لم تكُن تضم الكفر البيِّن والهرطقة وحسب، بل السلوك المشين أيضًا. ويُعتقد أنه قد وُجهت إليه اتهامات محدَّدة كان من بينها إبداء معارضة — قولًا وكتابةً — فكرة الثالوث وألوهية المسيح، والتشكيك في عذرية السيدة مريم البتول، أم المسيح. كما أنه طرح ذلك الاقتراح الصادم بوجوب التعايش بين الطوائف المختلفة للكنيسة المسيحية في وئام واحترام وجهات نظر بعضها مع بعض. وكانت هذه الخطايا، في نظر محاكم التفتيش، أعظم جرمًا من فرضية تعدُّدية العوالم، ولكنها أُضيفت إلى قائمة الاتهامات على أي حال.[٢] وكما هو معتاد مع المهرطقين، مُنح برونو في النهاية فرصةً للتراجع عن آرائه، وهو ما رفضه، وفي ٢٠ يناير عام ١٦٠٠ أعلن البابا كليمنت الثامن رسميًّا اتهامه بالهرطقة. وزُعم أنه لوَّح بإشارة تهديد للقضاة حين أصدروا الحكم عليه؛ إذ أُحرق على الخازوق في يوم ١٧ فبراير عام ١٦٠٠، بعد أن تمَّ تكميمه ليُمنع من التفوُّه بأي كلمات هرطقة أخيرة قد يسمعها المتفرِّجون. وفيما يلي بعض كلماته التي تنم عن عمق تفكيره، وإن لم تكُن من بين كلماته الأخيرة:

> لا يوجد ارتفاع مطلق ولا هبوط مطلق، كما علمنا أرسطو؛ ولا يوجد مَوْضعٌ مطلق في الفضاء؛ وإنما موضع جرمٍ ما هو موضع نسبي بالنسبة إلى مواضع الأجرام الأخرى. وفي كل مكان يوجد تغيير نسبي متواصل في الموضع عبر الكون، والراصد يكون دومًا في قلب الأحداث.

وعلى الرغم من أن فكرة اعتبار النجوم شموسًا أخرى سرعان ما أصبحت محل تقدير — كان إسحاق نيوتن واحدًا من بين عدة أشخاص حاولوا تقدير المسافات إلى النجوم من خلال افتراض أنها تحظى تقريبًا بنفس درجة سطوع شمس مجرتنا — لم يستطِع علماء الفلك قياس بعضٍ من تلك المسافات مباشرة إلا في أربعينيات القرن التاسع عشر باستخدام تقنية الإزاحة البصرية أو التخاطل الهندسية، التي تستعين بتغيُّر موضع النجوم القريبة مقارنةً بالنجوم البعيدة الموجودة في الخلفية أثناء حركة الأرض حول مدارها. ولم تُتِح لنا التقنيات الأخرى قياس المسافات البعيدة عبر الكون إلا في القرن العشرين، وفي

النهاية، وبحلول ثلاثينيات القرن العشرين، صارت فكرة الكون اللامحدود محل تقدير. ولكن حتى في ذلك الحين ظلَّت فكرة أن النجوم ربما يكون لها عائلات من الكواكب مجرَّد تكهُّنات.

تغيَّر الوضع في عام ١٩٩٥، تزامنًا مع اكتشاف كوكب يدور حول نجم، سُمي باسم «٥١ بيجاسي»، شبيه بالشمس تقريبًا. تمَّ التوصُّل إلى هذا الاكتشاف من خلال تحليل تذبذب النجم الذي تسبَّب فيه سحب الجاذبية الخاصة بالكوكب الذي يدور حوله. وهذه القياسات ممكنة؛ لأن التذبذب يُحدث تغييرًا دقيقًا للغاية في الخطوط الطيفية للنجم،[٣] وهي عملية تُعرف باسم تأثير دوبلر. وتبيَّن أن القياسات سهلة نسبيًّا؛ نظرًا إلى أن الكوكب كبير جدًّا ويدور بالقرب من النجم إلى حد ما؛ لذلك يتمتَّع بتأثير جاذبية عال نسبيًّا. ولم يكُن هذا ما توقَّعه علماء الفلك.

يوجد في مجموعتنا الشمسية أربعة كواكب صخرية صغيرة (تشبه كوكب الأرض إلى حد كبير) تدور في المنطقة الداخلية بالقرب من الشمس، وأربعة كواكب غازية كبيرة (تشبه كوكب المشتري إلى حد كبير) تدور في المناطق الخارجية، بالإضافة إلى قطع صغيرة ومتنوِّعة من الحطام، من بينها الجرم السماوي بلوتو. وفي ظل عدم توافر معلومات أخرى للعمل على أساسها، خمَّن علماء الفلك أن الأنظمة الكوكبية الأخرى ربما تكون مشابهة. غير أن الكوكب الذي يدور حول النجم «٥١ بيجاسي» هو كوكب كبير جدًّا، ويدور على مسافة قريبة جدًّا من نجمه. ولذا؛ صار يُعرف باسم كوكب «مشتري حار». فتبلغ كتلته أكثر من نصف كتلة كوكب المشتري، أكبر كواكب مجموعتنا الشمسية، ويدور حول نجمه في مسافة تبلغ عُشر مسافة عطارد، الكوكب الأقرب من الشمس داخل مجموعتنا الشمسية. وأول درس مستفاد من هذا هو أنه لا يمكنك التعميم استنادًا إلى مثال واحد! فمن الواضح أن مجموعتنا الشمسية ليست النوع الوحيد من النظم الكوكبية في الكون، بل ربما يكون استثنائيًّا. والنتيجة الطبيعية لذلك هي أنه لا ينبغي علينا افتراض أن كوكب الأرض هو كوكب نمطي، وسنستفيض في مناقشة هذه النقطة لاحقًا.

ومنذ عام ١٩٩٥، اكتُشِف العديد من الأنظمة الكوكبية «خارج المجموعة الشمسية»، والكثير منها يضم كواكب مشتري حارة، وبات معروفًا الآن أن الكثير منها يحوي كواكب متعدِّدة، تأتي في تكوينات وأشكال متنوِّعة، تدور حول النجوم المركزية. لم يعُد اكتشاف كوكب «جديد» خبرًا مثيرًا، فضلًا عن تصدُّره عناوين الصحف، ما لم يكُن من تلك الكواكب التي يروق لوكالات الأنباء أن تصفه بأنه كوكب «شبيه بالأرض». ولكن احذر عناوين

الصحف. فكل ما يقصدونه بذلك هو أن الكوكب صخري على الأرجح، وكتلته تبلغ بضعة أضعاف كتلة كوكب الأرض. فحجمه مماثل لحجم كوكب الأرض، وليس شبيهًا بالأرض. ولكي نوضِّح الفارق علينا أن نلقي نظرةً فقط على أقرب جيراننا في المجموعة الشمسية، ألَا وهو كوكب الزُّهَرة، الذي يدور حول الشمس بمسافة أقرب قليلًا من كوكب الأرض. ويكاد يكون حجم كوكب الزُّهَرة مماثلًا تمامًا لحجم كوكب الأرض، كما أنه كوكب صخري، وبوجه عام يُعتبر مُرشَّحًا لوصفه بالكوكب «الشبيه بالأرض» أفضل من أي كوكب آخر خارج المجموعة الشمسية تحتفي به وسائل الإعلام. فهو يتمتَّع بنفس الحجم، والكتلة، والكثافة والجاذبية السطحية. ولكن تصل درجة الحرارة على سطح كوكب الزهرة إلى ٤٦٢ درجة مئوية، وهي درجة حرارة كافية لصهر الرصاص. ودرجة الحرارة هذه ليست بسبب أن الكوكب أقرب قليلًا إلى الشمس من كوكبنا؛ وإنما الفضل في ذلك يرجع إلى التأثير القوي للاحتباس الحراري الناتج عن غلافه الجوي السميك الغني بثاني أكسيد الكربون. ويصل الضغط الجوي على سطح كوكب الزُّهَرة إلى ٩٢ ضعفًا للضغط الجوي على سطح كوكب الأرض، وهو ما يعادل الضغط الجوي على مسافة كيلومتر واحد تحت سطح البحر.

ويُعيدنا هذا إلى برونو مرةً أخرى وافتراضه بوجود العديد من الكواكب تُئوي العديد من الكائنات الحية، بما فيها البشر. فهناك عدد وافر من الكواكب. ويبدو أن كل نجم شبيه بالشمس، وربما كل نجم، يحظى بعائلة من الكواكب. دعونا لا نبالغ في التشاؤم. هناك مئات المليارات من النجوم في مجرة درب التبانة، مجرتنا الأصلية، الشبيهة بجزيرة وسط الكون. حتى وإن كانت نسبة صغيرة منها تحظى بأنظمة كوكبية مثل نظامنا الشمسي، وحتى لو كانت نسبة صغيرة من تلك الأنظمة تحظى بكوكب واحد على الأقل أشبه بالأرض من الزُّهَرة، فمن الممكن أن يكون هناك في الفضاء الخارجي ملايين المَواطن المحتملة لأشكال الحياة الشبيهة بنا، قبل حتى أن نفكِّر في الاحتمالات الأكثر غرابة. فنسبة واحد بالمائة من ١٠٠ مليار لا تزال تعادل مليارًا واحدًا، ونسبة واحد بالمائة من المليار تعادل ١٠ ملايين. ويشيع وجود الكواكب في الكون، وربما حتى تكون كواكب شبيهة بكوكب الأرض. وقد لا نكون وحدنا في هذا الكون. ومواطن الحياة ربما تكون معتادةً أيضًا. ولكن ماذا عن الحياة في حد ذاتها؟ كيف وصلنا إلى هنا؟ الإجابة قائمة على سبعة اكتشافات مذهلة بخصوص آلية عمل الكون؛ أعمدة العلم السبعة التي تعزِّز وجودنا، والوجود المحتمل لحياة أخرى في هذا الكون.

هوامش

(١) انظر أندرو وينر، https://www.jstor.org/stable/437245.

(٢) يقال إنه لولا برونو لربما اتخذت الكنيسة موقفًا عنيفًا ضد كوبرنيكس؛ إذ أدرجت كتابه فقط على قائمة الأعمال المحرَّمة في عام ١٦١٦، وظلَّ على هذه القائمة حتى عام ١٨٣٥.

(٣) التحليل الطيفي للنجوم هو واحد من أعمدة العلم التي سنناقشها لاحقًا.

العمود الأول: الأجسام الصلبة والفضاء الخاوي

الأجسام الصلبة فارغة. على الرغم من أنه كثيرًا ما يُستشهَد بهذا المثال على الطبيعة غير الاعتيادية للعالم، فلا يزال هذا المثال قادرًا على أن يستوقفك فجأةً إذا فكَّرت فيه. فأشياء مثل لوحة الكتابة «الصلبة» التي أكتب عليها، والأصابع التي أستخدمها في الكتابة، تتكوَّن من جُسَيْمات متناهية الصغر منتشرة عبر مساحات شاسعة نسبيًّا من الفراغ، تتماسك معًا بفعل القوى الكهربائية. ومثل هذه الفكرة مهمَّة ومذهلة في آنٍ واحد، حتى إن ريتشارد فاينمان قال عنها إنها أهم حقيقة اكتشفها العلم عن العالم. وكما هو الحال مع العديد من الموضوعات، يجدر بنا اقتباس كلماته حرفيًّا:

> لو أن المعرفة العلمية ضاعت كلها، إثر وقوع كارثة ما، ولم تتبقَّ سوى جملة واحدة لتنتقل إلى الجيل التالي من المخلوقات، ما الجملة التي تحوي أكبر قدر من المعلومات بأقل عدد من الكلمات؟ أعتقد أنها «الفرضية الذرية» (أو الحقيقة «الذرية»)، أو أيًّا ما كان الاسم الذي ترغب في تسميته بها) بأن «كل الأشياء مكوَّنة من ذرات؛ جسيمات صغيرة تنتقل في حركة دائمة، ويجتذب بعضها بعضًا حين تفصل بينها مسافة صغيرة، ولكنها تأبى أن تنضغط بعضها بداخل بعض».
> في تلك الجملة الواحدة، سترى كمًّا هائلًا من المعلومات عن هذا العالم، فقط إذا استعنَّا بقليل من الخيال والتفكير.[١]

بيد أن عددًا قليلًا من علماء الفيزياء يتمتَّعون بملَكة الخيال (أو بالأحرى، الرؤية الفيزيائية)، ولم يُحسم الجدل حول الاعتقاد بأن فاينمان كان يتمتَّع بهذه المَلَكة، وما

إذا كان العالم يتكوَّن فعلًا من مثل هذه الجُسَيْمات إلا في السنوات الأولى من القرن العشرين، رغم أن فكرة الذرات طُرحت قبل ذلك بكثير.

عادةً ما يعود الفضل في التفسيرات الرائجة للنظرية الذرية (أو أيًّا ما ترغب في تسميتها به) إلى الفيلسوف ديموقريطوس، الذي عاش في القرن الخامس قبل الميلاد، والفيلسوف إبيقور، الذي عاش في الفترة بين عامَي ٣٢٤ و٢٧١ قبل الميلاد تقريبًا. ولكن لم تكُن فكرتهما عن الأجسام الصغيرة، التي تتحرَّك في «الفراغ» وتتفاعل بعضها مع بعض، سوى رأي لأقلية، سخر منه فلاسفة مثل أرسطو الذي رفض فكرة الفراغ. ولم يُعَدْ إحياء الفكرة إلا في عام ١٦٤٩ على يد الفيلسوف بيير جاسندي، حين أشار إلى أن الذرات لها أشكال مختلفة ويمكنها أن تتَّحد معًا عبر آلية تشبه آلية الربط بين المشبك والعروة. وأكَّد على عدم وجود شيء على الإطلاق في الفجوات الموجودة بين الذرات. وكان هذا تمهيدًا لجدال استمرَّ لما يربو على مائتَي عام. من ناحية، كان هناك ما يمكننا تسميته بالمدرسة النيوتونية للفكر، تيمُّنًا بإسحاق نيوتن، والتي حبَّذت الفرضية الذرية؛ ومن ناحية أخرى، كانت هناك المدرسة الديكارتية، تيمُّنًا برينيه ديكارت، الذي بغض فكرة الفراغ أو الخواء. وتفاقم الخلاف بين المدرستَين في القرن التاسع عشر.

بدايةً من خمسينيات القرن التاسع عشر فصاعدًا، واستنادًا إلى الأعمال السابقة لجون دالتون، تزايد قَبول علماء الكيمياء لفكرة الذرات، وأن ذرات العناصر المختلفة لها أوزان مختلفة، وتتحد معًا لتُكوِّن الجزيئات، ومن ثم اعتُبر جزيء الماء، مثلًا، مزيجًا من ذرَّتَي هيدروجين متحدتَين مع ذرة أكسجين. واستطاعوا قياس أوزان (أو كتل على وجه الدقة) ذرات مختلِف العناصر من خلال مقارنتها بعنصر الهيدروجين، الذي يُعتبر العنصر الأخف وزنًا. بل واستطاعوا أيضًا حساب عدد الجُسَيْمات (سواء أكانت ذرات أم جزيئات) التي ينبغي أن توجد في عينة أي عنصر يتوافر وزنه الذري (أو الجزيئي) بالجرامات؛ أي ١ جرام من الهيدروجين، ١٢ جرامًا من الكربون، ١٦ جرامًا من الأكسجين، وهكذا. وكان من شأن كل عَيِّنة من هذه العينات أن يكون لها عدد الجسيمات ذاته. وصار هذا العدد يُعرف باسم ثابت أفوجادرو، نسبةً إلى العالم الرائد الذي طوَّر النظرية الكامنة وراءه، وهو عدد ضخم جدًّا. ولكن قبل أن أتطرَّق إلى مدى ضخامته، ينبغي أن أوضِّح وجه المعارضة لهذه الأفكار، تلك المعارضة التي ظلَّت قائمةً حتى في بداية القرن العشرين، والتي تُبرز مدى الروعة الحقيقية لفكرة الذرات هذه.

جاءت المعارضة من جانب علماء الفيزياء والفلاسفة الذين أشاروا إلى ما اعتبروه خطأً فادحًا في فكرة الأعداد الكبيرة للجُسَيْمات الدقيقة المتحرِّكة في حَيِّز الفراغ، لترتدَّ بعضها

عن بعض وتسير في طريقها وفقًا لقوانين الحركة التي وضعها إسحاق نيوتن. والعنصر الجوهري في قوانين نيوتن أنها قابلة للعكس. والطريقة المعتادة لتسليط الضوء على هذا هي تأمُّل التصادم بين كرتَي بلياردو. كرة تتحرَّك، مثلًا، من ناحية اليسار، وتصطدم بكرة ثابتة، ثم تتوقَّف، في حين تتحرَّك الكرة الأخرى ناحية اليمين. إذا قمت بتصوير هذا الحدث على هيئة فيديو، وقمت بتشغيله عكسيًّا من النهاية إلى البداية، سيبدو جيدًا تمامًا. ستتحرَّك الكرة ناحية اليمين، وتصطدم بالكرة الثابتة، ثم تتوقَّف، في حين أن الكرة الأخرى ستتحرَّك ناحية اليسار. لا تشتمل قوانين نيوتن على «خط زمني». ولكن العالم الواقعي يحوي اتجاهًا للزمن يمثِّل جزءًا لا يتجزَّأ منه. الآن، إذا تخيَّلنا ضربة البداية لكرة الدفع البيضاء وهي تصطدم بالكرات المتراصَّة على طاولة البلياردو بحيث تنتشر الكرات في جميع الاتجاهات، فالموقف هنا غير قابل للتراجع والسير في الاتجاه العكسي، رغم أن كل تصادم يحدث بين الكرات يخضع لقوانين نيوتن. إن «تشغيل الفيديو عكسيًّا» ينتج عنه متوالية لا نراها مطلقًا في عالم الحياة اليومية؛ بمعنى أن نرى حركة تراجع الكرات من جميع الاتجاهات لتتصادم، وتعود في رصتها الأنيقة على هيئة مُثلَّث، بينما تقترب كرة واحدة نحو العصا.

عبَّر علماء القرن التاسع عشر عن سمة اللارجعة لعالم الحياة اليومية من خلال الحرارة، أو عِلم الديناميكا الحرارية. فأشاروا إلى أن الحرارة تنتقل دائمًا من جسم ساخن إلى جسم بارد. فعند وضع مكعَّب من الثلج في كوب ماء دافئ، فإنه يكتسب الحرارة من المياه ويذوب، إلا أننا لا نرى مطلقًا ماءً في كوب تزداد حرارته تلقائيًّا بينما تتكوَّن كتلة من الثلج في منتصف الكوب. ولكن قوانين نيوتن تسمح تمامًا بوقوع هذا السيناريو وسيناريو ضربة كرة البلياردو «المعكوسة». ولذا، كان الاستنتاج المبدئي لعلماء الديناميكا الحرارية في القرن التاسع عشر هو أنه لا يمكن أن تتألَّف الأشياء من جُسَيْمات صغيرة تتحرَّك وفقًا لتلك القوانين. ولكن حُلت المعضلة آنذاك.

توصَّل ما لا يقل عن ثلاثة من كبار المفكِّرين إلى الحل، ولكن كل منهم على حدة. فقد أدركوا أنه يجب وصف سلوك عدد كبير من الجسيمات المتفاعلة وفقًا لقوانين نيوتن من منظور إحصائي، وتوصَّلوا إلى معادلات لتقدير الطريقة التي يتصرَّف بها عدد كبير للغاية من الجسيمات، واتخذت شكل قوانين صارت تُعرف باسم الميكانيكا الإحصائية. وهذا يؤكِّد لنا، بطريقة رياضية صرفة، أنه على الرغم من عدم وجود شيء في قوانين الفيزياء يمنع تكوُّن مُكعَّبات الثلج في أكواب المياه الدافئة، فإن مثل هذا الحدث مستبعَد

وقوعه تمامًا، وسيحدث مرةً واحدةً فقط خلال زمن طويل جدًّا جدًّا، وهو وقت يمكن حسابه إذا عُرف عدد الجسيمات المشاركة.[٢] ويمكن الْتماس العذر لأول عالِمَين قاما بتقدير هذا وعملا على وضع قوانين الميكانيكا الإحصائية نظرًا إلى عدم دراية أيٍّ منهما بأعمال الآخر. فقد كان لودفيج بولتزمان يعمل في أوروبا، بينما عمل ويلارد جيبس في الولايات المتحدة، وحتى في مطلع القرن التاسع عشر كانت الأفكار العلمية تستغرق بعض الوقت حتى تعبر المحيط الأطلنطي. أمَّا المخترع (أو المكتشف) الثالث للميكانيكا الإحصائية فكان عذره أقل، لا سيما أنه ظهر على الساحة بعد ذلك بفترة قصيرة. ولكنه اشتُهر بعدم اهتمامه بمواكبة ما كان يفعله الآخرون، مفضِّلًا بذلك أن يكتشف كل شيء بنفسه. كان اسمه ألبرت أينشتاين، وممَّا يدل على أن النظرية الذرية للمادة تفتقر إلى الرسوخ أنه انطلق في بداية القرن العشرين يبحث عن أدلة «من شأنها أن تضمَّن بقدر المستطاع وجود ذرات ذات حجم محدَّد.»[٣] وظهر تصوُّره للميكانيكا الإحصائية في سلسلة من ثلاثة أبحاث استثنائية، نُشرت بين عامَي ١٩٠٢ و١٩٠٤، كان من شأنها أن تضمن له الشهرة العلمية، لو كان هو أول من ظهر على الساحة. ولكن في عام ١٩٠٥، ومن بين إنجازات أخرى قام بها، نشر البحث العلمي الذي أثبت أخيرًا حقيقة الذرات والجزيئات للجميع باستثناء بضعة فلاسفة معارضين للتغيير. من السهل على غير الرياضيين أيضًا فهم الفكرة؛ لذا سأطرح الميكانيكا الإحصائية جانبًا وأركِّز على الجانب الفيزيائي.

يعود الجانب الفيزيائي إلى عمل قديم كان أينشتاين على دراية به على الأقل، ولكن على نحو محدود فحسب. ولم تكُن هذه نقطة الانطلاق لأبحاثه؛ لأنه مرةً أخرى كان يعمل عليها انطلاقًا من المبادئ الأولى، ولكن هذه المرة حاول أن يُقدِّر كيف لعيِّنة صغيرة من المادة — مثل ذرة من الغبار — مُعلَّقةٍ في سائل — كوب ماء مثلًا — أن تتحرَّك، بينما تنهال عليها ذرات وجزيئات مصطدمة بها من جميع الجهات. قام بدراسة هذا النوع من الحركة عالِم النبات الاسكتلندي روبرت براون في عشرينيات القرن التاسع عشر. كان اهتمامه نابعًا من مشاهدات، أجراها باستخدام الميكروسكوبات، لحبوب لقاح تتراقص في المياه بحركة مهتاجة، تشبه الركض في المكان. كان التفسير الطبيعي آنذاك هو أن حبوب اللقاح تنبض بالحياة، وتتحرَّك تحت تأثير قوتها الدافعة. ولكن اختبر براون هذه الفرضية من خلال فحص حُبيبات شظايا زجاج وحُبيبات جرانيت صلبة في المياه، ووجد أنها تتحرَّك بالطريقة نفسها. وأثبت هذا أن الحركة لا علاقة لها بالحياة، وصارت تُعرف باسم الحركة البراونية.

بدأ أينشتاين عمله بحساب كيف تجعل الذرات والجزيئات حبات الغبار العديمة الحياة تتحرَّك في سائل، ولكنه بدأ من أسفل لأعلى، لا من أعلى لأسفل. وفي الفقرة الأولى من البحث الذي أجراه عن الموضوع في عام ١٩٠٥، يقول:

> من الممكن أن تتطابق الحركات التي سنناقشها هنا مع ما يُسمَّى بالحركة الجزيئية البراونية، ولكن البيانات المتاحة لي عن هذه الحركة الأخيرة ليست دقيقةً للغاية، لدرجة أنني لا يمكنني تكوين رأي عن هذه المسألة.

«البيانات المتاحة» لم تكُن «دقيقةً للغاية»؛ لأنه لم يستطِع أن يكلِّف نفسه عناء البحث عنها، وثمة شك قوي في أن هذه العبارة حتمًا أُضيفت بعد أن قرأ صديق له مُسَوَّدة للبحث، ونبَّهه إلى وجود صِلة تربط بين هذا وبين الحركة البراونية. ولكن بغضِّ النظر عن دوافعه، فسَّر أينشتاين الحركة البراونية بواحدة من الرؤى الثاقبة التي تطرأ على ذهن العباقرة، ولكنها تجعلك تتساءل بعد ذلك لماذا لم يفكِّر أحد بها، مدعومًا بالتقديرات التي توفِّر للمختبرين شيئًا لاختباره.

لقد أدرك أينشتاين أن الجسيمات الكبيرة بما يكفي لفحصها باستخدام ميكروسكوبات حديثة — حُبيبات مثل حبوب اللقاح، أو شظايا الزجاج — كانت أصغر وأدق من أن تتحرَّك على نحو مرئي واضح إثر التصادم مع ذرة واحدة أو جزيء واحد. ولكن تُقصَف هذه الجسيمات في سائل باستمرار من كل الجهات بأعداد كبيرة من الذرات والجزيئات. ولا يمكن أن يكون هذا القصف متساويًا تمامًا. ففي أي لحظة، سيحدث عدد أكبر قليلًا من التصادمات على جهة، بينما يحدث عدد أقل من التصادمات على الجهة الأخرى. وسينزاح الجسيم قليلًا في الاتجاه الذي يشهد تصادمات أقل. لكن حينئذٍ سيتغيَّر التوازن، وسيُدفع ببطء في اتجاه مختلف. والنتيجة المجملة لهذا أن الجسيم يهتز، لا أقصد هنا الركض في المكان، وإنما العدْو البطيء في مسار متعرِّج والابتعاد تدريجيًّا عن المكان الذي بدأ من عنده. ويُعرَف هذا المسار الآن بالمسار العشوائي، وكانت هذه هي الرؤية الأساسية لأينشتاين.

أوضح أينشتاين أنه أينما يبدأ الجسيم في التحرُّك، فإن المسافة التي يقطعها ليبتعد عن النقطة التي يبدأ منها تُحسب بناءً على الجذر التربيعي للوقت الذي استُغرِق في ذلك. إذن، إذا تحرَّك الجسيم مسافةً مُعيَّنة خلال ثانية واحدة، فسيتحرَّك ضعف هذه المسافة في أربع ثوانٍ (لأن ٢ هي الجذر التربيعي للعدد ٤)، ويتحرك أربعة أضعاف في ست عشرة

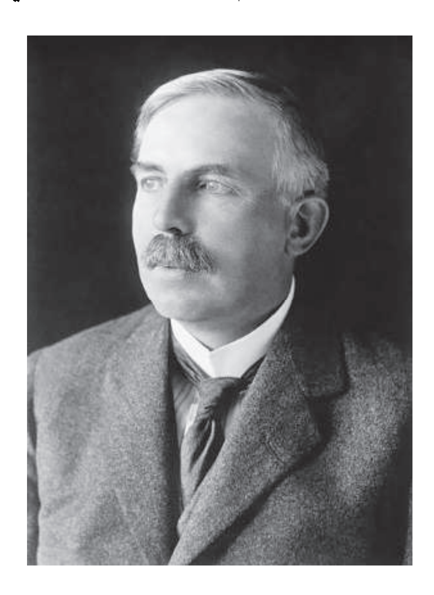
ثانية، وهكذا. ولكنه لا يستمر في الاتجاه نفسه. فبعد مرور أربع ثوانٍ، يكون قد ابتعد ضعف المسافة، ولكن في اتجاه عشوائي وغير متوقَّع، وبعد ست عشرة ثانية، يبتعد أربعة أضعاف المسافة في اتجاه عشوائي آخر. وهذا يُسمَّى بإزاحة «جذر متوسِّط المربَّع»، وصار من الممكن للمختبرين أن يختبروا هذا التنبُّؤ. وبالاستعانة بثابت أفوجادرو من دراسات أخرى، استنتج أينشتاين أن جسيمًا قطره ٠,٠٠١ ملِّيمتر في مياه بدرجة حرارة ١٧ درجةً مئويةً من شأنه أن يُغيِّر موضعه بمقدار ستة أجزاء من المليون من المتر من نقطة بدايته في دقيقة واحدة. والمعادلة الحسابية الحديثة لثابت أفوجادرو؛ أي عدد الجزيئات في الوزن الجزيئي لمادة ما محسوبة بالجرامات، تساوي ٦,٠٢٢١٤٠٨٥٧ × $١٠^{٢٣}$، أو رقم ٦ يتبعه ٢٣ صفرًا تقريبًا. وهذا يعطيك فكرةً عن سبب هيمنة السلوك الإحصائي لمادة ما على التفاعلات العكسية الفردية لإفراز تأثيرات مثل ذوبان مكعَّبات الثلج والحركة البراونية.[٤] وكما لخَّص أينشتاين قائلًا:

> إذا ثبت خطأ تقدير هذه الحركة؛ فإن هذه الحقيقة ستكون حجةً بعيدة المدى ضد مفهوم الحركة الجزيئية للحرارة.

بالطبع لم يثبت خطؤه، واعتُبِر هذا دليلًا دامغًا على حقيقة الذرات والجزيئات. ولكن هناك ما هو أكثر، أكثر ممَّا أدرك أينشتاين في عام ١٩٠٥.

توضِّح النظرية الحركية الجزيئية للحرارة التي ذكرها أينشتاين أن الأشياء اليومية الدارجة تنقسم إلى ثلاث حالات: صلبة أو سائلة أو غازية. يُعَد الغاز مثالًا نموذجيًّا للذرات المتحرِّكة في الفراغ، دون وجود أي شيء بينها. أمَّا السائل فيُصوَّر باعتباره مجموعةً من الذرات (أو الجزيئات) تنزلق بعضها أمام بعض بسلاسة وحرية إلى حد ما، ولا يوجد بينها فراغات. وأمَّا في حالة الجسم الصلب، تُصوَّر الجسيمات مُرَتَّبةً بإحكام في مجموعة، بحيث يُلامس أحدها الآخر، وأيضًا بلا أي فراغات بين الذرات أو الجزيئات. إذن لماذا وَصفتُ لوحة مفاتيحي وأصابعي باعتبارها حيزًا فارغًا عادة؟ كان هذا اكتشافًا مثيرًا حقًّا، وقد توصَّل إليه الباحثون في مانشستر في نهاية العَقد الأول من القرن العشرين؛ أي منذ أكثر من مائة عام بقليل.

كان هانز جايجر وإرنست مارسدن هما مَن قاما بإجراء التجارِب فعليًّا، وكانا يعملان تحت إشراف إرنست رذرفورد. كان رذرفورد واحدًا من الأعلام البارزين في مجال تطوير الفيزياء آنذاك. جاء من نيوزيلاندا، وعمل في تسعينيات القرن التاسع عشر بجامعة



إرنست رذرفورد. «مكتبة الكونجرس/ساينس فوتو لايبراري».

كمبريدج، في إنجلترا، حيث درس سلوك الأشعة السينية المُكتشفة حديثًا، وبعد ذلك، انتقل في عام ١٨٩٨ إلى جامعة ماكجيل في مونتريال، حيث درس الاكتشاف العظيم الآخر في ذلك الوقت، ألَا وهو النشاط الإشعاعي. واستقرَّ في مانشستر في عام ١٩٠٧. وفي غضون عام، توصَّل فريقه إلى أن أحد أشكال هذا الإشعاع، وسُمي أشعة ألفا، وهو عبارة عن تيار من الجُسَيْمات، كل جسيم منها مماثل لذرة هيليوم فقدت وحدتَين من الشحنة الكهربائية السالبة (أو إلكترونَين كما نعرف الآن). ونظرًا إلى أن هذا يترك ذرات الهيليوم المنزوعة الإلكترونات، والمعروفة أيضًا باسم جسيمات ألفا، بوحدتَين من الشحنة الكهربائية الموجبة، يمكن التحكُّم فيها باستخدام المجالات الكهربائية والمغناطيسية، وتوجيهها على هيئة أشعة وتسريعها؛ وممَّا يدل على سرعة تطوُّر الفيزياء خلال العَقد الأول من القرن العشرين أنه بحلول عام ١٩٠٩، كان فريق مانشستر يستخدم جُسَيْمات ألفا الناتجة عن النشاط الإشعاعي الطبيعي، وعالجها بهذه الطريقة لفحص بنية المادة بدقة.

في ذلك الحين، ذهب أنصار النظرية الذرية إلى أن الذرات عبارة عن كرات ذات شحنة كهربائية موجبة يتاخمها إلكترونات سالبة الشحنة مغروسة في الكرات، مثل البذور المغروسة داخل ثمرة البطيخ، أو حبات الخوخ الموجودة في حلوى بودينج الخوخ

(طوَّر هذا النموذج العالم جيه جيه طومسون، الذي كان معلِّمًا لرذرفورد في أيامه الأولى بجامعة كمبريدج، ويرجع إليه الفضل في اكتشاف الإلكترون). أطلق رذرفورد وجايجر جسيمات ألفا عبر صفائح رقيقة من رقاقات الذهب، وراقبا مدى انحرافها في طريق رحلتها. اكتُشف وجود جسيمات ألفا التي مرَّت عبر الرقاقة على الجانب الآخر باستخدام شاشة ومضية، حيث أصدرت ومضات صغيرةً من الضوء.[٥] كان لدى جايجر طالبٌ واعد، يُدعى مارسدن، أراد أن يشجِّعه، فأشار رذرفورد إلى أن بإمكانه أن يرى ما إذا كان هناك أي جسيم من جسيمات ألفا قد انعكس عن طريق الرقاقة. ولم يتوقَّع أحد أنه سيرى الكثير، أو سيرى أي شيء على الإطلاق. كانت مهمَّةً من تلك المهام المملة وربما عديمة الفائدة التي يُعهد بها إلى طالب ليكتسب خبرةً في إجراء التجارِب. ولكن ما أدهشه أن مارسدن رأى ومضات على شاشة الكاشف بمعدَّل أكثر من جسيم في الثانية الواحدة. كان عدد كبير من جسيمات ألفا ينعكس بطريقة أو أخرى، إمَّا من خلال الانحراف عبر زاوية كبيرة إلى إحدى الجهات، أو الارتداد مرةً أخرى إلى الناحية التي جاءت منها تقريبًا. وكما أشار رذرفورد لاحقًا: «كان الأمر يبدو وكأنك أطلقت قذيفةً قطرها ١٥ بوصةً على قطعة من المناديل الورقية وارتدَّت إليك وأصابتك.» ولكن لم تظهر أي رؤى إدراكية مفاجئة لتفسير ما كان يجري.

كانت أول فكرة تبادرت إلى رذرفورد هي احتمالية وجود شحنة كهربائية سالبة مركَّزة في أعماق نموذج طومسون للذرة (نظرية بودينج الخوخ). وهذا من شأنه أن يجذب الشحنة الموجبة وجسيمات ألفا السريعة الحركة ويرسلها لتتأرجح حول الشحنة السالبة وتعود في الاتجاه الذي جاءت منه، مثل مذنَّب ينجذب بفعل جاذبية الشمس ويتأرجح حولها قبل أن يعود إلى الفضاء العميق. وبعد سلسلة متواصلة من التجارِب الدقيقة لتكوين صورة أوضح لما كان يجري، توصَّل إلى فكرة أفضل، توافقت مع نمط الومضات بمزيد من الدقة. لا بد أن ثمة شحنةً كهربائية «موجبةً» مركزةً في مركز الذرة (التي تسمَّى الآن النواة)، يُحيط بها سحابة أكبر بكثير من الشحنات السالبة ذات الإلكترونات. تنساب أغلب جسيمات ألفا عبر سحابة الإلكترونات وتمضي في طريقها، بيد أن العدد الصغير نسبيًّا الذي وصل إلى النواة مباشرةً انعكس بفعل شحنته الموجبة وارتد عائدًا. وبالاستعانة بإحصائيات التجرِبة، حيث تأثَّر جسيم واحد من بضعة آلاف جسيم بهذه الطريقة، استنتج رذرفورد في عام ١٩١١ أن حجم النواة كان أقل من مائة ألف جزء من حجم الذرة. وقد أُعلن عن اكتشاف تركيز الشحنات في قلب الذرة خلال اجتماع علمي في

مانشستر، ونُشر في مايو ١٩١١، رغم أن رذرفورد لم يُعلن تأييده القاطع لفكرة النواة «الموجبة» الشحنة إلا في عام ١٩١٢. وكان لا بد من انتظار تطوُّر نظرية الكم لتفسير السبب وراء عدم وقوع الإلكترونات السالبة الشحنة داخل النواة الموجبة الشحنة، ولكن منذ تلك اللحظة فصاعدًا لم يَعد ثمة شك في أن الذرة أغلبها مساحة فارغة، وسرعان ما أصبح واضحًا أن جسيمات ألفا ما هي إلا أنوية هليوم.

أظهرت القياسات الحديثة أن قطر النواة يتراوح ما بين ١٫٧ فيمتومتر، تقريبًا (١٫٧٥٦٦ × ١٠$^{-١٥}$ متر) للهيدروجين (أخف عنصر)، وحوالي ١٢ فيمتومترًا لليورانيوم، أثقل عنصر بطبيعة الحال. وتتراوح أقطار الذرات من ٠٫١ إلى ٠٫٥ نانومتر (من ١ × ١٠$^{-١٠}$ متر إلى ٥ × ١٠$^{-١٠}$ متر)؛ ومن ثم فإن الأحجام النسبية للذرات والأنوية تتوافق كثيرًا مع التقديرات الأولية لرذرفورد.

بالنسبة إلى الأشخاص الذين لا يألفون مثل هذه الأرقام الصغيرة، يمكن تخيُّل خواء الذرة على نحوٍ تصويري أكثر. لو كان حجم النواة بحجم حبة الرمال، لكان حجم الذرة في حجم قاعةٍ ألبرت. كذلك يعادل فارق الحجم بين الذرة والنواة تقريبًا فارق الحجم بين جسدك وواحدة من خلاياك. أمَّا بالنسبة إلى جمهور الألعاب الرياضية، فلو كان حجم النواة يضاهي حجم كرة جولف، لوصل قطر الذرة إلى نحو ٢٫٥ كيلومتر. أظنك قد كوَّنت صورةً الآن. إن القوى الكهربائية التي تعمل في سحب الفضاء شبه الخاوي المحيط بالنوى الصغيرة هي فقط ما يمكِّن الذرات من التماسك معًا لتكوين الأجسام «الصلبة». وسلوك الإلكترونات الموجودة في السحب المحيطة بالنوى أيضًا هو ما يُتيح لنا استكشاف المادة التي تتكوَّن منها النجوم.

هوامش

(١) كتاب «ست قطع سهلة»، دار نشر بيزيك بوكس، الطبعة المنقحة الرابعة (٧ أبريل ٢٠١١).

(٢) سيكون عليك الجلوس لمراقبة ذلك الكوب من الماء لوقت أطول من العمر الحالي للكون بأكمله لكي تحظى بفرصة مشاهدة تكوُّن مكعَّب من الثلج بهذه الطريقة.

(٣) من كتابه «ملاحظات من السيرة الذاتية»، تحرير بي إيه شيلب، دار نشر أوبن كورت، إلينوي، ١٩٧٩.

(٤) في حال كنت مهتمًّا بسيناريو كرات البلياردو تلك، لكي تتحرَّك مجموعة من الكرات الثابتة الراقدة فوق الطاولة معًا في مجموعة متراصة، من شأن مادة الطاولة أن

تبرد إثر نقلها الطاقة إلى الكرات، مثلما يفقد الثلج طاقته ويعطيها للماء الموجود في الكوب. هذا ممكن ولكنه بعيد الاحتمال إلى أقصى حد؛ وهذا بسبب العدد الهائل من الجُسَيْمات الموجودة على الطاولة التي سيتعيَّن عليها أن تتعاون معًا، و«ليس» بسبب العدد القليل نسبيًّا لكرات البلياردو التي يجب أن تتعاون وتتحرَّك معًا.

(٥) ليس لهذا صلة بعدَّاد جايجر الشهير، رغم أنه نفس الجايجر!

العمود الثاني: النجوم هي شموس ونحن نعرف مُكوِّناتها

في عام ١٨٣٥ كتب الفيلسوف أوجست كونت يقول: «ما من وسيلة معقولة يمكننا بواسطتها أن نحدِّد التركيب الكيميائي للنجوم يومًا ما.» وفي عام ١٨٥٩، قُدِّمت تقنية لتحديد التركيب الكيميائي للنجوم في ورقة بحثية إلى الأكاديمية البروسية للعلوم. يبرز هذا التباين إلى أي مدًى كانت هذه مفاجأةً مدهشة، على الرغم من أن ذلك البحث المقدَّم عام ١٨٥٩ كان أبعد عن أن يسطِّر نهاية القصة.

جاءت بداية القصة في الواقع في عام ١٨٠٢، وهو ما لم يكُن معروفًا إلى كونت، عندما درس الطبيب والفيزيائي الإنجليزي ويليام هايد ولاستون الطيف الناتج عن أشعة الشمس عندما ينتشر عبر موشور زجاجي مثلثي ويصنع شكل قوس قزح. فقد لاحظ أن الشكل قد تفكَّك بفعل خطوط داكنة، اثنان في الجزء الأحمر من الطيف، وثلاثة في المنطقة الخضراء، وأربعة في الطرف الأزرق. فظن أن هذه مجرَّد فجوات بين الألوان، ولم يستكمل اكتشافه. وفي عام ١٨١٤ توصَّل العالم الصناعي الألماني جوزيف فون فراونهوفر إلى الاكتشاف نفسه على نحو مستقل عندما كان يُجري تجارِب لتحسين جودة الزجاج المستخدم في صناعة العدسات والمواشير. لاحظ في البداية التأثير المضاد لذلك الذي اكتشفه ولاستون؛ فعند تمرير الضوء الصادر من شعلة لهب عبر موشور، كان هناك خطَّان باللون الأصفر الفاتح في الطيف، بأطوال موجية محدَّدة على نحو جيد جدًّا. واستعان بهذا الضوء الأصفر الخالص ليختبر الخصائص البصرية لأنواع مختلفة من الزجاج، ثم بحث في الطريقة التي أثَّر بها الزجاج على أشعة الشمس. عند تلك النقطة رأى الخطوط الداكنة التي اكتشفها ولاستون وكان يجهلها. ونظرًا إلى امتلاكه معدات أفضل وزجاج ذي جودة عالية، رأى

فراونهوفر عددًا أكبر بكثير من الخطوط في الطيف الشمسي، أحصى منها ٥٧٦ خطًّا في النهاية، لكل منها طول موجي محدَّد؛ وجاءت النتيجة في مجملها أشبه بباركود. والشيء اللافت للنظر أنه قد رأى نفس نوعية نمط الخطوط في الضوء الصادر من كوكب الزهرة ومن النجوم. ولم يُعرف مطلقًا ما الذي تسبَّب في هذا النمط، ولكنها حتى يومنا هذا تُعرف بخطوط فراونهوفر.

الخطوة الكبرى التالية كانت من نصيب روبرت بنزن وجوستاف كيرشوف، اللذَين كانا يعملان بجامعة هايدلبرج في خمسينيات القرن التاسع عشر. عرف كلٌّ منهما، مثلما كان جميع الكيميائيين يعرفون في ذلك الوقت، أن المواد المختلفة التي تُنثر في شعلة لهب متوهِّجة من شأنها أن تجعله يتوهَّج بألوان مختلفة؛ كاللون الأصفر للاستدلال على عنصر الصوديوم (كما هو في ملح الطعام، كلوريد الصوديوم)، والأخضر المزرق للاستدلال على عنصر النحاس، وهلم جرًّا. وكان لديهما موقد من نوع جيد جدًّا لاستخدامه في «تجارِب اللهب» هذه، وهو الموقد الذي سُمي باسم بنزن نفسه،[1] وصمَّما جهازًا يدمج موشورًا وعدسةً تشبه تلك الخاصة بالميكروسكوب لدراسة الضوء بالتفصيل (وكان هذا أول مطياف ضوئي). وعندما حلَّلا الضوء الملوَّن الناتج بهذه الطريقة باستخدام التحليل الطيفي، وجدا أن كل عنصر في حرارة اللهب يُنتج خطوطًا حادةً ومُميَّزةً بأطوال موجية محدَّدة. كان الخطان الأصفران اللذان لاحظهما فراونهوفر ناتجَين عن الصوديوم، أمَّا النحاس فيُنتج خطوطًا حادةً في الجزء الأخضر المزرق من الطيف، وهلم جرًّا. وأدركا أن أي جسم ساخن ينتج نمطه الخاص من الخطوط المميزة في الطيف.[2] ثم تدخَّلت الصدفة.

ذات ليلة، وبينما كانا يعملان داخل مختبرهما في مدينة هايدلبرج، اندلع حريق كبير بمدينة مانهايم، على بُعد عشرة أميال من المختبر. وقد وُجدا في الوقت المناسب بالمكان المناسب ليُحلِّلا الضوء الصادر عن الحريق باستخدام التحليل الطيفي، واستطاعا أن يُحدِّدا الخطوط المناظرة لعنصري السترونشيوم والباريوم في الطيف. ووفقًا لقصة تكرَّرت بنسخ مختلفة على مر أزمنة مختلفة لاحقة، كان بنزن وكيرشوف يسيران بمحاذاة نهر نيكار بعد مرور بضعة أيام على الحريق، حين قال بنزن شيئًا من قبيل: «إذا كان في استطاعتنا أن نحدِّد طبيعة المواد المحترقة في مانهايم، ينبغي أن نكون قادرين على القيام بالشيء نفسه مع الشمس. ولكن الناس سيصفوننا بالجنون لأننا نحلم بشيء كهذا.»

عند العودة إلى المعمل اختبرا هذه الفكرة المجنونة. وتعرَّف كيرشوف على نحو شبه فوري على الخطوط المزدوجة المألوفة للصوديوم في الجزء الأصفر من الطيف الشمسي،

ثم وجدا، وكان لكيرشوف السبق في ذلك، أن الكثير من خطوط فراونهوفر الداكنة تظهر عند أطوال موجية حيث تُنتج عناصر معيَّنة خطوطًا ساطعةً عند تسخينها على لهب موقد بنزن. وكان الافتراض المنطقي المترتِّب على هذا هو أنه على الرغم من أن الأجسام الساخنة تُنتج خطوطًا ساطعةً في الطيف، فإن الأجسام الباردة، عند مرور الضوء عبرها، تمتص الضوء عند الأطوال الموجية المناظرة، ممَّا ينتج عنه خطوط داكنة. فلا بد أن يمر الضوء المنبعث من الجزء الداخلي الساخن للشمس عبر الطبقات الخارجية الأكثر برودةً لينتج هذا التأثير. وأمكن تحديد مكونات الشمس. واندهش كيرشوف للغاية حتى إنه قال متعجِّبًا، استكمالًا لحوارهما على ضفاف النهر: «بنزن، لقد أصابني الجنون!» ليرد بنزن قائلًا: «وكذلك أنا يا كيرشوف.» كان هذا العمل هو ما شكَّل الأساس للبحث الذي قدَّمه كيرشوف إلى الأكاديمية البروسية في ٢٧ أكتوبر عام ١٨٥٩. لقد أمكن حقًّا تحديد مكوِّنات الشمس والنجوم. أم كان ذلك ممكنًا بالفعل؟

في البداية بدا كل شيء على ما يرام. وجاء النجاح العظيم للتقنية الجديدة لتحليل الضوء المنبعث من النجوم بعد كسوف الشمس الذي شهدته الهند في يوم ١٨ أغسطس عام ١٨٦٨، وهو أول كسوف للشمس بعد إدراك كيرشوف أن خطوط فراونهوفر ناتجة عن عناصر محدَّدة تحجب الضوء عن الشمس عند أطوال موجية معيَّنة. في أثناء الكسوف، عندما يحجب القمر الضوء المنبعث من قرص الشمس الأساسي، يمكن دراسة الضوء الأكثر خفوتًا المنبعث من مناطق فوق السطح مباشرة. وقد قام الفلكي الفرنسي بيير جانسين بهذه الدراسة، ووجد خطًّا أصفر فاتحًا جدًّا قريب الشبه من خطوط الصوديوم المتوقَّعة. كانت هذه السمة بارزةً للغاية لدرجة أنه لاحظ أنه لا يزال بإمكانه دراستها حتى بعد انتهاء الكسوف، فدوَّن المزيد من الملاحظات قبل عودته إلى فرنسا. في هذه الأثناء طوَّر الفلكي الإنجليزي نورمان لوكير مطيافًا جديدًا استخدمه في دراسة الضوء المنبعث من المناطق الخارجية للشمس في ٢٠ أكتوبر عام ١٨٦٨. ووجد الخط الأصفر نفسه. يعود الفضل في هذا الاكتشاف إلى جانسين ولوكير. بيد أن لوكير وحده هو من أخذ الخطوة الجريئة المتمثِّلة في ادِّعاء أن هذا الخط ينتج حتمًا عن عنصر مجهول على سطح الأرض، وأسماه الهيليوم، اشتقاقًا من الكلمة اليونانية المستخدمة للشمس. وظلَّ الافتراض الذي طرحه مثار جدل حتى عام ١٨٩٥، عندما اكتشف وليام رامزي أن غازًا ينبعث من اليورانيوم (نعرف الآن أنه نتاج للتحلُّل الإشعاعي) ينتج عنه اللون الأصفر الفاتح نفسه الموجود في الطيف. وقد «اكتُشف» بالفعل عنصر في الشمس قبل ٢٧ عامًا من اكتشافه على الأرض. وفي مطلع

القرن العشرين بدا أن العدد الكبير من العناصر المحدَّدة بواسطة المطياف يبرهن لنا على أنه بالرغم من أن الشمس تحافظ على سخونتها بواسطة عملية مجهولة، فإن تكوينها كان شبيهًا للغاية بتكوين الأرض. ولكن هذا التفسير للأدلة كان خاطئًا. فقد كانت لا تزال هناك مفاجآت أخرى.

على الرغم من أن التفسير كان خاطئًا؛ فقد كان قائمًا على أدلة بدت دامغة. ففي نهاية القرن التاسع عشر لخَّص هنري رولاند المعرفة المتوفِّرة عن الشمس في صورة سلسلة من الجداول تحدِّد ٣٦ عنصرًا، وتذكر تفاصيل عن قوة خطوطها الطيفية. وكشفت هذه المعلومات الكميات النسبية لهذه العناصر — عدد ذرات الأكسجين بالنسبة إلى كل ذرة من ذرات الكربون، وهكذا — التي تتوافق مع الكميات التي نراها على كوكب الأرض. ونتيجةً لعمل رولاند إلى حد كبير، ظلَّت فكرة أن تكوين الشمس يتشابه إلى حد كبير مع تكوين الأرض، قائمةً ربع قرن من الزمان. ثم جاءت المفاجأة الأولى.

في عام ١٩٢٤ كانت سيسيليا باين تعكف على دراستها للحصول على درجة الدكتوراه من جامعة هارفارد. كانت باين سيدةً إنجليزية، درست بكلية نيونهام بكمبريدج، ولكن لم يُسمح لها بالحصول على أي درجة علمية من هناك، فضلًا عن درجة الدكتوراه؛ نظرًا لكونها امرأة. ولهذا السبب سافرت إلى أمريكا، حيث صارت في عام ١٩٢٥ أول امرأة تحصل على درجة الدكتوراه من كلية رادكليف، استنادًا إلى عملها بمرصد جامعة هارفارد. كانت هذه مجرد البداية لمسيرة مهنية متألِّقة،[٣] ولكن لا شيء يفوق ما حقَّقته في منتصف عشرينيات القرن العشرين. كانت نقطة الانطلاق بالنسبة إليها بحثًا حديثًا أجراه الفيزيائي الهندي ميجناد ساها شرح فيه كيفية تأثُّر تفاصيل خطوط فراونهوفر بالظروف الفيزيائية (مثل درجة الحرارة والضغط، وهكذا) في أجزاء مختلفة من النجم. ومع توافر هذه المعلومات لديها، استطاعت سيسيليا أن تحسب نسب ثمانية عشر عنصرًا في عدة نجوم على نحو أدق من أي شخص سبقها إلى ذلك، مبيِّنةً أن هذه النسب واحدة بالنسبة إلى جميع النجوم بمجرَّد فتح المجال أمام هذه التأثيرات. وأغلب هذه الوفرة من العناصر كانت متوافقةً مع جداول رولاند لوفرة العناصر الشمسية. ولكن كان ثمة اختلاف واحد كبير. فوفقًا لحسابات باين كانت النجوم تحوي كمًّا من الهيدروجين والهيليوم يفوق على نحو ساحق أي عناصر أخرى مجتمعةً معًا.

عندما أعدَّت باين مُسَوَّدة أطروحتها التي ضمَّت هذا الاكتشاف، أرسلها هارلو شابلي المشرف على رسالتها، لتراجع على يد هنري نوريس راسل أحد كبار الفلكيين بجامعة



سيسيليا باين جابوشكين. «معهد سميثسونيان/ساينس فوتو لايبراري».

برينستون. وقال إن هذه النتيجة «مستحيلة بكل وضوح». وكان راسل في عام ١٩١٤ قد كتب في مقال عن «الطيف الشمسي وقشرة الأرض» يقول:

> إن في تطابق القوائم الشمسية والأرضية تأكيدًا بالغ القوة لرأي رولاند، القائل إنه إذا ارتفعت درجة حرارة القشرة الأرضية إلى درجة حرارة الغلاف الجوي للشمس، فسيكون لها طيف الامتصاص نفسه. فقد كان ثمة تشابه بين أطياف الشمس والنجوم الأخرى؛ ولذا بدت الوفرة النسبية للعناصر الموجودة في الكون أشبه بتلك الموجودة في قشرة الأرض.[٤]

وظلَّ مُتمسِّكًا بذلك الرأي. وعندما قدَّمت باين أطروحتها في عام ١٩٢٥ أضافت، بناءً على نصيحة شابلي، العبارة التالية: «الوفرة الهائلة المُستنَبطة لعنصرَي [الهيدروجين والهليوم] داخل الغلاف الجوي للنجوم غير حقيقية على نحو شبه مؤكَّد.»

ولكن كانت هذه فكرة قد حان وقتها. ففي عام ١٩٢٨، أجرى الفلكي ألبرشت أونسولد، الذي كان يعمل بجامعة جوتينجن، دراسةً على الطيف الشمسي، واستنتج أن الغلاف الجوي للشمس يغلب على تركيبه عنصر الهيدروجين. كان هناك طالب دراسات بحثية أيرلندي، هو ويليام ماكراي، يزور جامعة جوتينجن في ذلك الوقت، وطوَّر هذا الطرح بعملية حسابية أظهرت أن الغلاف الجوي للشمس يحتوي على كم من ذرات الهيدروجين يفوق كم أي عناصر أخرى مجتمعة معًا ملايين المرات، باستثناء عنصر

الهليوم.[٥] وحصل على درجة الدكتوراه بأطروحة بعنوان «مشكلات متعلِّقة بالطبقات الخارجية للشمس»، من جامعة كمبريدج في عام ١٩٢٩. في الوقت نفسه تقريبًا كان راسل بصدد تغيير رأيه بخصوص استحالة النتائج التي توصَّلت إليها باين. وانطلاقًا من عمل أونسولد، وباستخدام معادلات الفيزيائي ساها أيضًا، أجرى راسل دراسةً تفصيليةً عن الطيف الشمسي، قدَّمت الوفرة النسبية لـ ٥٦ عنصرًا. وكانت هذه أفضل مجموعة بيانات متوفِّرة آنذاك عن تركيب الشمس؛ إذ تضمَّنت أدلةً على أن «الوفرة الهائلة لعنصر الهيدروجين يستحيل التشكيك فيها»، رغم أنه وصفها بأنها «كبيرة على نحو يكاد يصل حد عدم التصديق». كان راسل حريصًا على أن يوفي باين حقها كاملًا عندما نشر بحثه الخاص، ولكن نظرًا إلى أنه كان عالِمًا بارزًا له مكانته، أحدث بحثه ضجةً كبيرةً آنذاك، وكثيرًا ما نُسب إليه وحده الفضل في هذا الاكتشاف فيما أُغفلت إسهاماتها. وترك بحثه أثرًا أعمق من بحث باين، رغم أن بحثها كانت له الأسبقية، وفي عام ١٩٦٢ وصف الفلكي أوتو ستروف أطروحتها بأنها «أروع أطروحة دكتوراه كُتبت في علم الفلك على الإطلاق» حتى ذلك الوقت. وهكذا صار ما كان «مستحيلًا» في عام ١٩٢٥ «شبه» مذهل في عام ١٩٢٩.

ولكن كان لا يزال هناك الكثير ممَّا أثار دهشة علماء الفلك، وهو ما أُشير إليه في تعليق راسل في عام ١٩١٤ بأن «الوفرة النسبية للعناصر الموجودة في الكون بدت مماثلةً لتلك الموجودة في قشرة الأرض.» فإذا كانت النجوم لا تتكوَّن من نفس العناصر الوفيرة الموجودة في قشرة الأرض، فإن تركيب الكون لا يشبه تركيب قشرة الأرض. وعلى وجه التحديد يحتوي الكون حتمًا على قدر أكبر كثيرًا من الهيدروجين والهليوم. غير أن هذا القدر لم يتبيَّن بوضوح إلا بعد مرور نحو ثلاثة عقود على الأبحاث الرائدة لباين وأونسولد وماكراي وراسل.

بحلول أواخر عشرينيات القرن العشرين، كوَّن علماء الفلك فهمًا جيدًا إلى حدٍّ مذهل عن طبيعة نجم مثل الشمس، رغم أنهم لم يعرفوا التفاصيل الدقيقة بخصوص كيفية توليدها للحرارة في داخلها. فالنجم في الأساس عبارة عن كرة من الغاز الساخن يوازن بين قوتَين مضادتَين للحفاظ على حالة التوازن. تحاول الجاذبية أن تضم أجزاء الكرة معًا بحيث تنكمش، في حين أن الضغط الذي يتولَّد بفعل الحرارة من داخلها يدفعها إلى التمدُّد إلى الخارج. ويستطيع علماء الفلك حساب كتلة الشمس من خلال دراسة مدارات الكواكب الثابتة في أماكنها بفعل جاذبية الشمس، وبذلك يعرفون مدى شدة القوة الجاذبة إلى الداخل. ونظرًا إلى حالة التوازن السابقة فإن هذا يعني أنهم يعرفون مدى شدة القوة

الدافعة إلى الخارج، وهو ما ينبئهم بالظروف داخل الشمس، بما فيها درجة الحرارة في لبها. وتوصَّل عالم الفيزياء الفلكية الرائد آرثر إدينجتون إلى هذه التفاصيل، ونشرها في كتاب بعنوان «التكوين الداخلي للنجوم» في عام ١٩٢٦. وفي ذلك الحين، وبفضل ألبرت أينشتاين، عرف علماء الفيزياء أن الطاقة من الممكن أن تتحرَّر من خلال الاندماج النووي. ويمكن أن تتحرَّر كمية كبيرة من الطاقة بهذه الطريقة إذا أمكن تحويل أربع أنوية هيدروجين (وهي عبارة عن بروتونات أحادية) إلى نواة هليوم (جسيمات ألفا، كل جسيم منها يتكوَّن من بروتونَين ونيوترونَين متحدَين معًا)؛ نظرًا إلى أن كتلة كل نواة هليوم أقل من الكتلة المجمَّعة لأربعة بروتونات مستقلة. والطاقة المنبعثة من كل اندماج تساوي هذه الكتلة «المفقودة» مضروبةً في مربع سرعة الضوء. وحتى قبل أن يدرك علماء الفلك كمَّ الهيدروجين الذي تحويه الشمس والنجوم بالتحديد، وكان يُرجَّح أن يكون كل القدر المتاح منه مشاركًا في هذه العملية، اقترح إدينجتون أن حرارتها تتولَّد بهذه الطريقة؛ نظرًا إلى أن «الهيليوم الذي نتعامل معه لا بد أنه قد تجمَّع في وقت مُعيَّن وفي مكان مُعيَّن.» وكان السؤال هو: كيف حدث ذلك؟

تعرقل البحث عن إجابةٍ لهذا السؤال بسبب وقوع مصادفة مؤسفة. ففي ثلاثينيات القرن العشرين طوَّر علماء الفيزياء الفلكية «نماذج» أكثر تفصيلًا (مجموعة من المعادلات تصف ما كان يحدث) للأجزاء الداخلية للنجوم. ووجدوا أن الضغط الذي يجعل نجمًا ما يبقى ثابتًا بالأعلى له شقَّين. الشق الأول هو العملية المعتادة التي نظن أنها عملية الضغط، حيث تثب الجسيمات وتتصادم بعضها مع بعض، مثل جزيئات الهواء داخل بالون. ولكن الجزء الداخلي من النجم ساخن جدًّا لدرجة أن الإلكترونات السالبة الشحنة تُنتزع من النوى الموجبة الشحنة. فيتفاعل طوفان الجسيمات المشحونة الناتج مع الإشعاع الكهرومغناطيسي — الضوء، والأشعة السينية، وما إلى ذلك — المنبعث من قلب النجم ليشق طريقه إلى السطح. وينتج عن هذا قوة خارجية إضافية، تُعرف باسم ضغط الإشعاع. فنجم مثل الشمس يكون مستقرًّا عندما يعمل هذان النوعان من الضغط معًا على موازنة قوة السحب الداخلية للجاذبية. ولكن تبيَّن أن ثمة طريقتَين لتحقيق هذا التوازن.

يتوقَّف الضغط العادي على عدد الجسيمات الموجودة. فالإلكترونات أخف كثيرًا من البروتونات والنيترونات لدرجة أنه يمكن تجاهلها في هذا الإطار؛ ومن ثم فإن ما يهم هو النوى الذرية. ولكن ضغط الإشعاع يتوقَّف على عدد الإلكترونات. فذرة الهيدروجين بها إلكترون واحد فقط، وبذا يمكن أن تساهم بإلكترون واحد لكل نواة، ولكن ذرة الهيليوم

بها إلكترونان، ومن ثم يمكنها أن تساهم بإلكترونَين لكل نواة، وهلم جرًّا. وبِناءً على ذلك فإن نسب الضغط الإجمالي الناتجة عن الضغط العادي وضغط الإشعاع تتوقَّف على عدد أنوية العناصر الثقيلة الموجودة في هذا المزيج. الصدفة المؤسفة هي أن التوازن في قوة السحب الداخلية للجاذبية في نجم بكتلة الشمس وسطوعها، أو أي نجم آخر مشابه لها، يمكن أن يتحقَّق من خلال مزيج بين نوعَي الضغط «إمَّا» إذا كان ٩٥ بالمائة من النجم يتكوَّن من مزيج من الهيدروجين والهيليوم، «أو» من ٣٥ بالمائة فقط من العناصر الخفيفة و٦٥ بالمائة من العناصر الثقيلة. وفي ثلاثينيات القرن العشرين، بعد أن أدرك علماء الفلك أن النجوم لا تتكوَّن بالكامل من العناصر الثقيلة، جنح العلماء نحو الخيار الثاني. وكان قَبول فكرة أن العناصر الشبيهة بتلك العناصر الموجودة على كوكب الأرض لا تشكِّل أكثر من ٥ بالمائة من الشمس والنجوم، قفزةً أكبر من أن يستطيعوا استساغتها وتقبُّلها.

إذن كانت المحاولات الأولى لتفسير كيفية تولُّد الطاقة داخل النجوم — كيف تمتزج نوى الهيدروجين لتكوِّن نوى هليوم — قائمةً على افتراض أنها تتكوَّن من ٣٥ بالمائة من الهيدروجين. وكان لهذا الفهم المغلوط أثره على أبحاث أوائل الباحثين والعلماء الذين حاولوا تفسير العملية، والتي تعاون في إجرائها فريتز هاوترمانس وروبرت أتكينسون في البداية، ثم طوَّرها أتكينسون وحده. وجوهر هذه الفكرة أن الأنوية الأثقل تمتص أربعة بروتونات واحدةً تلو الأخرى، ثم تلفظ جسيمات ألفا؛ أي أنوية الهيليوم. وتبيَّن أن هذه العملية مهمَّة في بعض النجوم الأكبر حجمًا قليلًا من الشمس، ولكن العملية التي تُطلق الطاقة حقًّا داخل الشمس أبسط كثيرًا. تبدأ هذه العملية باتحاد بروتونَين معًا ولفظ بوزيترون (وهو نظير موجب الشحنة للإلكترون) لإنتاج ديوترون؛ وهو عبارة عن نواة تتكوَّن من بروتون واحد ونيوترون واحد متحدَين معًا. وينتج عن إضافة بروتون آخر نواة نظير الهيليوم-٣، وعند تفاعل نواتين من الهيليوم-٣ ينتج عنهما نواة نظير الهيليوم-٤ (بروتونان ونيترونان؛ أي جسيم ألفا) مع قذف بروتونَين. وتكون النتيجة النهائية هي تحوُّل أربعة نوى هيدروجين إلى نواة هليوم. وقد توصَّل تشارلز كريتشفيلد في عام ١٩٣٨ إلى جوهر «تفاعل بروتون-بروتون المتسلسل» هذا، ولكن لم يُفهم فهمًا كاملًا إلا في خمسينيات القرن العشرين مع التوصُّل إلى أن ٩٥ بالمائة على الأقل من تركيب الشمس يتكوَّن من الهيدروجين والهيليوم.

أنت بحاجة إلى كمية كبيرة من الهيدروجين لتتم هذه العملية بنجاح؛ نظرًا إلى ضآلة احتمالات اصطدام أي نواتَي هيدروجين إحداهما بالأخرى بقوة تكفي لتكوين نواة

ديوترون، حتى في ظل الظروف القصوى بقلب الشمس. وتوضِّح لنا التقديرات الحديثة، التي أسهم ظهور أجهزة الكمبيوتر الإلكترونية العالية السرعة إلى حد كبير في إجرائها، أن بروتونًا واحدًا مستقلًّا، يثب في قلب الشمس حيث تصل درجة الحرارة إلى حوالي ١٥ مليون درجة مئوية، من شأنه أن يستغرق ١٤ مليار عام قبل أن يدخل في صدام مباشر مع بروتون آخر لتكوين ديوترون. بعض البروتونات تستغرق وقتًا أطول، وبعضها الآخر يستغرق وقتًا أقل، ولكن من الناحية الإحصائية اصطدام واحد يحدث كل ١٠ مليارات تريليون عام سيؤدِّي إلى بدء تفاعل بروتون-بروتون المتسلسل. والخطوات التالية في سلسلة التفاعل مستبعد حدوثها على نحو مماثل. ففي كل مرة تتحوَّل أربعة بروتونات إلى نواة هليوم واحدة، تتحوَّل معها ٠٫٧ فقط من الكتلة إلى طاقة. ولكن على الرغم من ندرة هذه الأحداث والكمية الضئيلة من الطاقة المنبعثة من الكتلة في كل مرة، تُحوِّل الشمس إجمالًا ٥ ملايين طن (أي ما يكافئ وزن مليون فيل أفريقي من الحجم المتوسِّط) من كتلتها إلى طاقة في الثانية الواحدة، بينما ٦١٦ مليون طن من الهيدروجين يتحوَّل إلى ٦١٦ مليون طن من الهيليوم. وظلَّت الشمس تقوم بذلك لمدة ٤٫٥ مليارات عام، ولكنها بدأت بكمية كبيرة جدًّا من الهيدروجين لدرجة أنها لم تُحوِّل إلا ٤ بالمائة من وقودها الهيدروجيني إلى رماد هيليوم.

أمَّا فيما يخص تركيب الشمس (والنجوم المشابهة)، فالوضع أكثر تعقيدًا ممَّا أشارت له التقديرات الحسابية البسيطة التي أُجريت في ثلاثينيات القرن العشرين. فقد ذكرت هذه التقديرات أن ٩٥ بالمائة «على الأقل» من تركيب الشمس يأتي بلا شك على هيئة هيدروجين وهيليوم. أمَّا الآن فنحن نعلم، بناءً على مزيج من المشاهدات والنمذجة الحاسوبية، أنه من حيث الكتلة تتكوَّن الشمس من ٧١٪ من عنصر الهيدروجين، و٢٧٪ تقريبًا من عنصر الهيليوم، وأقل من ٢٪ من باقي العناصر الأخرى مجتمعة. أمَّا من حيث عدد الذرات (الأنوية)، فإن الأعداد أكبر من ذلك إلى حد يُثير الدهشة. فتُشكِّل أنوية الهيدروجين ٩١٫٢٪ من الشمس، والهيليوم ٨٫٧٪، أمَّا باقي العناصر فتكوِّن ٠٫١٪ فقط. وتنطبق هذه الأرقام على نسب العناصر الكيميائية الموجودة في النجوم عبر الكون، أمَّا الكواكب فهي عبارة عن ذرات غبار ضئيلة (بمصطلحات علم الكونيات) مقارنةً بالنجوم الأم (إذ يساوي حجم الشمس ١٫٣ مليون كوكب بحجم الأرض مجتمعة). وتمثِّل جميع العناصر التي تشكِّل أهميةً بالنسبة إلينا جزءًا من نسبة الـ ٢٪، أو الـ ٠٫١٪ إذا كنت ستحصي عدد الذرات، وهي فكرة من نوعية الأفكار التي نشأت بعد الخليقة. وقد كانت هذه واحدةً من كبرى مفاجآت

العلم. ولكن يقال، وهو الأمر الأكثر إثارةً للدهشة، إن نسبة الـ ٢٪ نتج عنها كائنات حية، بما فيها نحن أنفسنا. وطريقة حدوث ذلك هو عمود آخر من أعمدة العلم.

هوامش

(١) كان الموقد الأساسي من تصميم مايكل فاراداي، وطوَّره بيتر ديزاجا مساعد بنزن الذي سوَّقه تحت اسم بنزن.

(٢) لم يُعرف تفسير هذا الأمر إلا بعد تطوير نظرية الكم في القرن العشرين، ولكن لم يكُن هذا يمثِّل أهميةً بالنسبة إلى الكيميائيين في تلك الفترة.

(٣) أغلبها أُجري تحت اسمها بعد الزواج، سيسيليا باين جابوشكين.

(٤) مجلة «ساينس»، مجلد ٣٩، صفحة ٧٩١.

(٥) بعد ذلك بكثير كان ماكراي مشرفًا عليَّ حين كنت أدرس علم الفلك في جامعة ساسكس، ولكن للأسف لم أكتسب أي قدر من عبقريته!

العمود الثالث:
لا وجود للقوة الحيوية

إن فكرة أن الحياة هبة خاصة — أي إن الكائنات الحية تُحرِّكها «قوة حيوية» غامضة تفتقر إليها الجمادات — فكرة أقدم من التاريخ نفسه، وقد ناقشها فلاسفة مصر القديمة واليونان. ويبدو أنها نابعة من المنطق السليم. ولكن كما هو الحال مع فهمنا لأمور كثيرة في هذا العالم، فإن المنطق السليم يكون مُضلِّلًا في إدراك الحقائق.

جاءت بداية تكوين فهم صحيح للكيفية التي تحيا بها الكائنات الحية مع التجارب التي أجراها كلٌّ من الكيميائي الفرنسي أنطوان لافوازييه وزميله بيير لابلاس في ثمانينيات القرن الثامن عشر. فقد وضعا خنزيرًا غينيًّا داخل وعاء كان موضوعًا داخل وعاءٍ آخر مملوء بالثلج، وقاسا كمية الثلج التي أذابتها حرارة جسم الحيوان خلال فترة زمنية محدَّدة. وكذلك قاسا مقدار «الهواء المثبت» (المعروف الآن باسم ثاني أكسيد الكربون) الذي زفره الحيوان. فوجدا أن مقداره كان مساويًا للمقدار الناتج عن إحراق الفحم لإذابة الكمية ذاتها من الثلج. فقد كان يُعتقد آنذاك أن الحيوانات خاضعة للقوانين ذاتها التي تخضع لها عملية احتراق الفحم أو الشموع.

على الرغم من ذلك ظهر اكتشاف آخر في العقد التالي أشار في البداية إلى وجود قوة حيوية بالفعل. فكما هو معروف لاحظ الطبيب الإيطالي لويجي جلفاني، على سبيل المصادفة، ارتجاف ساقَي ضفدع في أثناء تشريحه عند ملامستهما للحديد. ولكن القصة أكثر تعقيدًا قليلًا ممَّا توحي به العديد من الروايات الشائعة، وحريٌّ بنا استعراض التفاصيل لنتبيَّن الآلية التي تعمل بها عقلية العالِم.

أجرى جلفاني أنواعًا متعدِّدةً من التجارب، وحوى مختبره آلة تدوير يدوي تُولِّد كهرباء ساكنة عن طريق الاحتكاك، مثل الصدمة التي يمكن أن تتعرَّض لها حينما تلامس جسمًا معدِنيًّا عقب المشي فوق بعض أنواع السجاد. وفي أحد الأيام، وبينما كان يُشرِّح ساقَي أحد الضفادع، لامس المشرط الذي كان يستخدمه في التشريح الآلة والتقط شحنةً كهربية. وعندما لامس المشرط العصب الوركي لإحدى ساقَي الضفدع، أصدرت تلك الساق ركلةً وكأن الضفدع لا يزال حيًّا. فقاده ذلك إلى تجارب أظهرت أن سيقان أحد الضفادع الميتة تنتفض عند توصيلها مباشرة بالآلة الكهربية، أو إذا وُضعت على لوح معدِني في أثناء عاصفة رعدية عندما يكون هناك برق في السماء. غير أن ملاحظته الرئيسة جاءت مصادفة. ففي أثناء تجهيزه لمجموعات من سيقان الضفادع لإجراء تجاربه، كان يُعلِّقها في خطافات نحاسية في الهواء الطلق حتى تجف. وعندئذٍ لامس أحد هذه الخطافات سياجًا حديديًّا، فنتج عن ذلك ركلة من السيقان، رغم عدم وجود مصدر خارجي للكهرباء. وعندما أخذ السيقان والخطاف إلى الداخل، وحرص على إبقائها بعيدةً تمامًا عن آلته الكهربية، وجعل الخطاف يلامس حديدًا؛ انتفضت السيقان مجدَّدًا. وتكرَّر ذلك في كل مرة مع كل مجموعة من السيقان.

ظنَّ جلفاني أن هذا يثبت وجود نوع من «الكهرباء الحيوانية» تختلف عن الكهرباء «الساكنة» المولِّدة للبرق، أو التي يمكننا توليدها بالاحتكاك. وافتُرض أن هذه الكهرباء الحيوانية هي أحد أنواع السوائل التي تُصنَّع داخل الدماغ، وتُنقل إلى العضلات عن طريق الأعصاب، وتُخزَّن بها لحين الحاجة إليها. ولكن كان لمُواطن جلفاني، أليساندرو فولتا، رأيًا مخالفًا. فقد قال إن الكهرباء التي أسفرت عن النفضة لا صلة لها بالقوة الحيوية، وإنما هي نتيجة تفاعل تدخل فيه المعادن التي كانت السيقان الخاضعة للتشريح تلامسها. وقاده ذلك، من خلال سلسلة من التجارب، إلى اختراع جهاز لتوليد الكهرباء. كان هذا الاختراع عبارةً عن عمود من عدة أقراص من الفضة والزنك بالتناوب، يفصل بينها أقراص من الورق المقوى، مغموسة في محلول ملحي. عند توصيل الجزء العلوي من العمود بالجزء السفلي عن طريق سلك كهربي، تدفَّق تيار كهربي في السلك. وبهذا كان «العمود الفلطاني» أول بطارية كهربية.

طُوِّر اختراع فولتا في المعهد الملكي بلندن؛ حيث استعان همفري ديفي بهذا الاختراع في تجارب مذهلة استُخدمت فيها الكهرباء لتفكيك المركبات إلى العناصر المكوِّنة لها، ليكشف عن وجود معادن «جديدة»، من ضمنها البوتاسيوم والصوديوم. ولكن بدلًا من

دحض فكرة القوة الحيوية جاءت تجارب ديفي مشجعةً لبعض مُؤيدي الفكرة. وعلى وجه التحديد رأى أحد جراحي لندن، وهو جون أبرنيثي، وجود علاقة بين الكهرباء وشيء آخر أسماه الحيوية، وكان هذا بالأساس المسمَّى الذي يُطلقه على القوة الحيوية. وتعرَّضت استنتاجاته للهجوم من قِبل ويليام لورانس، وكان أحد زملائه، ممَّا أثار جدلًا احتدم في العقد الثاني من القرن التاسع عشر (ولم يكن تأليف ماري شيلي لروايتها «فرانكشتاين» في هذا الوقت تحديدًا من قبيل المصادفة؛ إذ كان لورانس الطبيب المعالج لزوجها بيرسي بيش شيلي، في الفترة من ١٨١٥ وحتى ١٨١٨). ولم تتمكَّن دراسة الكهرباء من حسم الخلاف. لكن كان من المرجَّح أن تُسطِّر النتيجة المذهلة لإحدى التجارب الكيميائية التي أُجريت عام ١٨٢٨ كلمةَ النهاية للمذهب الحيوي.

بنهاية القرن الثامن عشر، بدأ الكيميائيون يفهمون كيف تتحد المواد المختلفة لتكوين مركبات أكثر تعقيدًا. وسرعان ما اتضح أن الكربون قادر بالفعل على تكوين مجموعة كبيرة ومتنوِّعة من التركيبات المعقَّدة باتحاده مع غيره من العناصر، وأن الكائنات الحية تتكوَّن إلى حد كبير من مثل هذه المُركَّبات الكربونية المعقَّدة. وباتت كيمياء تلك المركَّبات الكربونية تُعرف باسم الكيمياء العضوية، واعتُبرت شيئًا مختلفًا عن كيمياء المركَّبات «غير العضوية» المعتادة، مثل الماء، وارتبطت بمفهوم المذهب الحيوي. وكان هناك اعتقاد بأن الكائنات الحية هي وحدها القادرة على إنتاج المركَّبات العضوية، وذلك بفضل القوة الحيوية.

وفي عام ١٧٧٣ نجح الكيميائي الفرنسي هيلير رويل في فصل بلورات مادةٍ ما لم تكن معروفةً من قبل من بَول حيوانات مختلفة، والبشر أيضًا. وصارت تلك البلورات تُعرَف باسم اليوريا، وكانت شيئًا أقرب إلى لغز؛ لأنه حتى في ذلك الحين كان واضحًا أنها مركَّب بسيط نسبيًّا (صيغته الحديثة هي $H_2N–CO–NH_2$). ولم تبدُ ذات تركيب معقَّد بالقدر الكافي الذي يتطلَّب تأثير القوة الحيوية لإنتاجها. ولكن لم يكُن الأمر كذلك كما تبيَّن بعد ذلك.

ففي عام ١٨٢٨ كان الكيميائي الألماني فريدريش فولر يسعى إلى إنتاج سيانات الأمونيوم عن طريق تفاعل حمض السيانيك مع الأمونيا. غير أن ناتج تجربته لم يكُن سيانات الأمونيوم. وأظهر له التحليل الدقيق أن المادة الناتجة كانت اليوريا؛ إذ كانت مطابِقة تمامًا للمادة المستخلصة من البول. وقد عبَّر عن دهشته في مقدمة البحث الذي كتبه لوصف الاكتشاف في عام ١٨٢٨ قائلًا:

> كشف هذا البحث عن نتيجة غير متوقَّعة؛ فعند اتحاد حمض السيانيك بالأمونيا تتكوَّن اليوريا. والحقيقة الغريبة جدًّا المستخلصة من هذه النتيجة أنه يمكن

> إنتاج البنية الاصطناعية (في المختبر) لمركب عضوي، يُسمَّى «مادةً حيوانية»، من مركَّبات غير عضوية.

واستخدم لهجةً أقل رسميةً في الرسالة التي كتبها في ذلك العام لزميله جيكوب برزيليوس، ليخبره بأنه [أي فولر]:

> تمكَّن من إنتاج اليوريا دون الحاجة إلى أي كُلية أو أي كائن حي، سواء أكان بشرًا أم كلبًا. فسيانات الأمونيوم هي يوريا ... فهي لا تختلف كيميائيًّا عن اليوريا الموجودة في البول، وقد نجحتُ في إنتاجها بمفردي.

لعل هذه كانت بمثابة ضربة قاضية لفكرة القوة الحيوية. ولكن أحد الأسباب التي حالت دون حدوث التأثير الفوري الذي قد نتوقَّعه عند الفهم العميق للأمر، يتبيَّن في الاقتباس المأخوذ من تلك الرسالة. فقد أظهرت الاختبارات التي أجراها فولر أن اليوريا وسيانات الأمونيوم متطابقتان كيميائيًّا. فجُزَيء سيانات الأمونيوم يحتوي بالفعل على الذرات نفسها الموجودة في جُزَيء اليوريا، ولكن بترتيب هندسي مختلف. وتُعرف هذه الجزيئات التوائم غير المتطابقة الآن باسم الأيزومرات، وكان انشغال فولر بمتابعة اكتشاف الأيزومرات يفوق اهتمامه بالانخراط في الجدل الدائر حول المذهب الحيوي. بالإضافة إلى أن اليوريا تُعَد مادةً بسيطةً نسبيًّا، وكان من الممكن أن يذهب بعض مؤيدي فكرة وجود نوع خاص من كيمياء الحياة (وهو ما حدث بالفعل) إلى صعوبة اعتبار اليوريا جزيئًا عضويًّا من الأساس. فقد كان هناك الكثير من الجزيئات العضوية الأخرى الأكثر تعقيدًا، ولم يكُن تخليقها ممكنًا.

كانت الوسيلة الوحيدة لإسدال الستار نهائيًّا على المذهب الحيوي هي تصنيع المزيد والمزيد من هذه الجزيئات العضوية المعقَّدة، باستخدام الجزيئات غير العضوية البسيطة، وهي عملية تُعرف باسم «التخليق الكامل». كان اكتشاف فولر مصادفةً سعيدةً وضربة حظ. ولكن في عام ١٨٤٥ أقدم عالِم كيميائي ألماني آخر، وهو أدولف كولبي، على تصنيع المركَّبات العضوية من مواد غير عضوية. فأخذ على عاتقه مهمَّة تحويل ثاني كبريتيد الكربون، وهو مركَّب غير عضوي يمكن إنتاجه بسهولة من العناصر المكوِّنة له، إلى حمض الأسيتيك، أو الخل، وهو مركَّب عضوي يُنتَج طبيعيًّا عن طريق التخمُّر. كان نجاح كولبي هو ثاني تجربة تخليق كامل لمركب عضوي من مركبات أولية غير عضوية، دون تدخُّل أي عمليات بيولوجية. ولكن في ظل وجود مثالَين فقط، يظل هناك الكثير من الجزيئات العضوية التي يتعيَّن فحصها.

في خمسينيات القرن التاسع عشر شرع العالِم الباريسي مارسيلان بيرتيلو، وهو معارض شبه إنجيلي للمذهب الحيوي، في استخدام التخليق الكامل لتصنيع جميع الجزيئات العضوية المعروفة آنذاك. كان مقتنعًا بأن جميع العمليات الكيميائية تستند إلى فعل قوًى فيزيائية يمكن دراستها وقياسها مثل القوى التي تتضمَّنها العمليات الميكانيكية. وكان برنامجه الخاص بالتخليق الكامل لجميع المواد العضوية نابعًا على نحو منطقي من هذه القناعة؛ كان حلمًا مستحيلًا، لكنه فعل ما يكفي ليُثبت أنه على حق.



مارسيلان بيرتيلو. «ساينس فوتو لايبراري».

أعدَّ بيرتيلو نهجًا تدرُّجيًّا. فبدأ بمركبات بسيطة تحتوي على الكربون والهيدروجين (الهيدروكربونات، مثل الميثان)، وحوَّلها إلى كحولات (تحتوي على مجموعة OH، وهو بالأساس جُزَيء ماء فقد إحدى ذرتَي الهيدروجين، فأصبح بإمكانه الارتباط بذرات أخرى)، ثم حوَّلها إلى إسترات (وفيها تُستبدل مجموعة الـ OH ليحل محلها مجموعة «ألكوكسي» أكثر تعقيدًا)، ثم حوَّلها إلى أحماض عضوية (تحتوي على مجموعات أشد تعقيدًا بكثير) وهلم جرًّا. وقد حقَّق بيرتيلو عدة نجاحات. فاستطاع تخليق حمض الفورميك (وهو المادة الكيميائية التي يستخدمها النمل في اللدغ) باستخدام النهج التدرُّجي الموضَّح للتو، وكذلك

الأسيتيلين (وكان هو من أطلق عليه هذا الاسم) عن طريق تنشيط قوس كهربي بين أقطاب الكربون في جو من الهيدروجين، والبنزين عن طريق تسخين الأسيتيلين في أنبوب زجاجي.

كان تصنيع البنزين خطوةً حاسمة. يتألَّف كل جُزَيء بنزين من ست ذرات كربون متصلة في شكل حلقة. يوجد البنزين بصورة طبيعية في النفط الخام، وهو بقايا الكائنات الحية، وتتميَّز تلك الجزيئات الحلقية، التي تُعَد عناصر أساسية ضمن مجموعة ضخمة ومتنوِّعة من المركَّبات، بأهمية خاصة في كيمياء الحياة. ويُعرف فرع الكيمياء الذي يتضمَّن تفاعلات مثل هذه الجزيئات الحلقية الآن باسم كيمياء العطريات أو الأروماتية.

كان برنامج بيرتيلو المذهل للتخليق الكامل برنامجًا طموحًا للغاية لدرجة يتعذَّر معها على شخص واحد إكماله بمفرده، إلا أنه أسَّس شيئًا يُعد الآن عمودًا من أعمدة العلم وركائزه. فقد أوضح أن من الممكن تصنيع مواد عضوية من أربعة عناصر موجودة في جميع الكائنات الحية، ألَا وهي: الكربون والهيدروجين والأكسجين والنيتروجين. هذه العناصر بالغة الأهمية، وفي كثير من الأحيان (بل دائمًا!) تجتمع معًا في المواد العضوية، حتى إنها يُشار إليها مجتمعةً باسم CHON. نشر بيرتيلو كتابه الرائع عن تخليق المواد الكيميائية العضوية تحت عنوان «الكيمياء العضوية القائمة على التخليق»، في عام ١٨٦٠. وبدا ذلك المسمار الأخير في نعش المذهب الحيوي. ولكن كان من الصعب استيعاب فكرة أن الكائنات الحية، بما فيها نحن البشر، ليست سوى مجموعات من المركَّبات الكربونية التي تعمل بفعل قوًى فيزيائية مثل القوى التي تتضمَّنها العمليات الميكانيكية — إذ تتنافى تمامًا مع «المنطق السليم» — حتى إنه في نهاية القرن التاسع عشر، كانت الفكرة القائلة بوجود شيء مميَّز بشأن كيمياء الحياة، وأن ثمة «قوةً حيويةً» تدخل فيما نسمِّيه بالعمليات الحيوية، لا تزال محل نقاش. وكان العالم الجليل لويس باستير داعمًا لتلك الفكرة. وجاء الدحض النهائي لهذه الفكرة في عام ١٨٩٧، بفضل أعمال العالِم الألماني إدوارد بوخنر.

كان التخمُّر أحد آخر الألغاز المحيِّرة التي أعطت أنصار المذهب الحيوي حجةً للجدال. فالتخمُّر يُحوِّل الأطعمة مثل السكر إلى مركَّبات أبسط مثل الكحول وثاني أكسيد الكربون، وينتج عنه طاقة تمد الخلايا الحية بالطاقة. ولكن هل كان يتضمَّن دائمًا خلايا حية؟ تصدَّى بوخنر لهذا التساؤل بإنتاجه للكحول، الذي يتضمَّن الخميرة، أحد الكائنات الحية. إن الخميرة ضرورية لهذه العملية، ولكن بوخنر أراد اختبار ما إذا كان هذا بسبب أن خلايا الخميرة تنبض بالحياة، أم لاحتوائها على مادة كيميائية (محفز) تحفِّز تحوُّل السكر إلى كحول وثاني أكسيد الكربون عن طريق تفاعلات غير عضوية.

بدأ بوخنر بالخلايا الحية للخميرة، ثم عرَّضها لسلسلة من عوامل الهلاك التي أدَّت إلى قتلها واختزالها إلى عناصرها الكيميائية المكوِّنة الأساسية. وبعدها خلط خلايا الخميرة الجافة مع رمل الكوارتز وصخور مفتَّتة ناعمة، ثم طحنها بواسطة مدقة وهاون. أصبح هذا الخليط رطبًا عندما انفجرت خلايا الخميرة وأطلقت محتوياتها. وبعدها عُصِر الخليط الرطب لاستخلاص «عصارة ضغط» اسُتخدِمت في التجارب.

عندما خُلِط محلول السكر مع عصارة الخميرة الناتجة للتو عن الضغط، نتجت فقاعات من الغاز، وفي النهاية تكوَّنت رغوة غطَّت السائل. وأظهرت الاختبارات الكيميائية أن نسب ثاني أكسيد الكربون والكحول الناتجة كانت مماثلةً للنسب ذاتها الناتجة عن التخمُّر باستخدام الخميرة الحية. ولكن المستخلص لم يحتوِ على خلايا خميرة حية.

بمتابعة هذه التجربة، اكتشف بوخنر أن المادة الكيميائية الأساسية المشاركة هي إنزيم أُطلق عليه إنزيم الزيماز. يُصنَّع الزيماز داخل خلايا الخميرة، ومن هذا المنطلق يشارك عنصر حيوي في عملية التخمُّر، ولكن النقطة الأساسية هي أن الزيماز ذاته يُعد مادةً كيميائيةً غير حية، والتخمُّر يحدث سواء كانت الخميرة حيةً أم ميتة. فالإنزيمات تلعب دورًا بالغ الأهمية في الكثير من العمليات البيولوجية، ولكن بات الآن ممكنًا تخليق الإنزيمات كيميائيًّا دون تدخُّل علم الأحياء. وقد كتب بوخنر عن ذلك لاحقًا قائلًا:

> يتكشَّف الفارق بين الإنزيمات والكائنات الدقيقة بوضوح عندما يُعبَّر عن الأخيرة بصفتها المنتجة للأولى، التي لا بد أن ننظر إليها بصفتها مواد كيميائية معقَّدة، ولكنها غير حية.

لا شك في أن الزيماز يُعد الآن واحدًا من الإنزيمات التي يمكن تخليقها دون تدخُّل من علم الأحياء. ولكن تظل النقطة الأساسية التي تستحق تكرارها هي أن العملية الكيميائية مستمرة سواء كانت الخميرة حيةً أم ميتة. ففي يناير عام ١٨٩٧ أرسل بوخنر بحثه العلمي المهم «عن التخمُّر الكحولي بدون استخدام خلايا الخميرة» إلى دورية الجمعية الكيميائية الألمانية «بيرشت دير دويتشين شيمشين جيزيلشافت».

حصل بوخنر على جائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٠٧ «عن أبحاثه في مجال الكيمياء الحيوية، واكتشافه للتخمُّر غير الخلوي». وهذا تاريخ مناسب كغيره من التواريخ، يصلح اختياره تاريخًا لموت المذهب الحيوي. ولكن خلَّف ذلك سؤالًا آخر. في ظل عدم وجود قوة حيوية، كيف نشأت الحياة إذن؟

فكَّر تشارلز داروين مليًّا في هذا اللغز، وافترض أن الحياة ربما تكون بدأت في «بركة صغيرة دافئة» على الأرض، تحتوي على المكوِّنات الكيميائية الملائمة للحياة. ولكنه أدرك أن ذلك لا يمكن أن يحدث اليوم. فقد كتب إلى جوزيف هوكر في عام ١٨٧١ يقول:

> كثيرًا ما يُقال إن جميع الظروف التي تهيَّأت لإنتاج أول كائن حي حاضرة الآن، وكان من الممكن أن تكون حاضرةً في أي وقت آخر. ولكن لو (ويا له من افتراض خطير!) تصوَّرنا أن بداخل بركة صغيرة دافئة، تحوي جميع أنواع أملاح الأمونيا والأملاح الفوسفورية، وفي وجود الضوء، والحرارة، والكهرباء، والكربون، تكوَّن أحد المركَّبات البروتينية كيميائيًّا، وكان جاهزًا للمرور بتغيُّرات أكثر تعقيدًا في وقتنا هذا؛ لكان مصير مثل هذه المادة التبدُّد أو الامتصاص على الفور، وهو ما لم يكُن ليحدث قبل تكوُّن الكائنات الحية.

بعد نصف قرن من كتابة داروين لتلك الكلمات، وضع ألكسندر أوبارين — عالِم الكيمياء الحيوية الروسي الذي وُلد في عام ١٨٩٤، وتخرَّج في جامعة موسكو الحكومية في عام ١٩١٧، عام الثورة الروسية — هذا النوع من التكهُّنات على أسس علمية سليمة. وكان أول طرح فعلي لأفكاره في عام ١٩٢٢، في أحد اجتماعات الجمعية النباتية الروسية، وهي الأفكار التي حوَّلها إلى كتاب بعنوان «أصل الحياة»، المنشور في عام ١٩٢٤. وكان ما حفَّز هذا التفكير الاكتشاف الأخير (بفضل التحليل الطيفي؛ فما من عمود من أعمدة العلم يقوم وحده!) الذي أوضح أن الغلاف الجوي لكوكب المشتري والكواكب العملاقة الأخرى في نظامنا الشمسي يحتوي على كمية كبيرة من الغازات مثل الميثان، وهو ما تصوَّره داروين (من بين آخرين) باعتباره المادة الأولية للحياة. ويُعد الغلاف الجوي للأرض اليوم غنيًّا بالأكسجين الشديد التفاعل. وهو أحد نواتج الحياة، ولكن لو لم يتجدَّد باستمرار، لاستُنفد في حرائق الغابات، وتعرية الصخور، وغيرها من العمليات. افترض أوبارين أنه لكي تبدأ الحياة في إحدى البرك الصغيرة الدافئة، عندما كانت الأرض حديثة النشأة، فإن ذلك يُحتِّم أن يكون غلافها الجوي مماثلًا للغلاف الجوي لتلك الكواكب العملاقة. ومثل هذا الغلاف الجوي «الاختزالي» ربما احتوى على الميثان والأمونيا وبخار الماء والهيدروجين، وربما أدَّى إلى تكوُّن الجزيئات العضوية تدريجيًّا، كما حدث في تجارب بيرتيلو. ولكنه لم يحتوِ على الأكسجين، الذي كان ليتفاعل مع المركَّبات الأولية للحياة ويُدمِّرها.

لُخصت حجة أوبارين في بضع خطوات، وهي:

- لا يوجد فارق جوهري بين الكائنات الحية والمادة الخالية من الحياة. فتعقيدات الحياة تطوَّرت حتمًا في أثناء عملية تطوُّر المادة.
- حظي كوكب الأرض في مهده بغلاف جوي شديد الاختزال، احتوى على الميثان والأمونيا والهيدروجين وبخار الماء، التي كانت بمثابة المواد الخام لتطوُّر الحياة.
- كلما زاد حجم الجزيئات وتعقيدها، زاد سلوكها تعقيدًا أيضًا، وتتحدَّد التفاعلات بين الجزيئات عن طريق شكل الجزيئات وطريقة توافقها معًا.
- حتى في هذه المرحلة المبكرة كان نشوء بُنًى جديدة محكومًا بالمنافسة، بصراع من أجل البقاء «تتغذَّى» فيه بُنًى معقدة على جزيئات أبسط، وبالانتقاء الطبيعي الدارويني.
- الكائنات الحية نُظم مفتوحة، تستقبل الطاقة والمواد الخام من الخارج؛ لذا فهي ليست مُقيَّدةً بالقانون الثاني للديناميكا الحرارية.

والنقطة الأخيرة هنا من النقاط المهمَّة التي عادةً ما تُغفل. يُعرف القانون الثاني للديناميكا الحرارية بأنه قانون الطبيعة الذي يخبرنا بأن الأشياء تبلى، وأن مقدار الفوضى في العالم (الذي يُقاس بكم يسمَّى الإنتروبيا أو القصور الحراري) في ازدياد دائمًا. والمثال النموذجي على ذلك هو كأس الشراب الذي يسقط من فوق الطاولة ويتحطَّم عند ارتطامه بالأرض. يكون الزجاج المحطَّم أكثر فوضى من وعاء الشرب الأصلي، وهذا يعني زيادة الإنتروبيا. ولا ترى أبدًا شظايا زجاج المحطَّم على الأرض تعيد ترتيب نفسها تلقائيًّا لتكوين وعاء للشرب، فيما يسمَّى إنتروبيا سلبية. ولكن يبدو أن الحياة تتحايل على هذا القانون. فبطريقة ما تخلق الحياة نظامًا من الفوضى، عاكسةً بذلك اتجاه تدفُّق الإنتروبيا. لكن لا يمكنها القيام بذلك إلا على أساس موضعي. فمثلما يتطلَّب صنع كوب الشراب مُدخلًا من الطاقة، يتطلَّب تكوُّن الكائنات الحية والحفاظ على الحياة مُدخلًا من الطاقة. وبالنسبة إلى المخلوقات الحيوانية أمثالنا، تأتي هذه الطاقة من غذائنا؛ وهو ما يعني أنها في النهاية تأتي من النباتات؛ لأننا حتى لو كنا نأكل اللحوم، فإن اللحوم مصدرها الحيوانات التي تغذَّت على النباتات. أمَّا بالنسبة إلى النباتات، تأتي الطاقة في النهاية من أشعة الشمس. إن الأرض النابضة بالحياة أشبه بفقاعة من تدفُّق الإنتروبيا العكسي؛ إذ تتغذَّى كلها على تيار الطاقة المتدفِّق من الشمس. وتُعوَّض هذه الطاقة على نحو

كافٍ تمامًا بالزيادة الضخمة في الإنتروبيا المرتبطة بالعمليات التي تحافظ على سطوع الشمس.

كان الطرح الخاص الذي عرضه أوبارين ينص على أنه بمساعدة الطاقة المنبعثة من ضوء الشمس أو مصدر خارجي آخر ما، مثل البرق، داخل هذا الغلاف الجوي الاختزالي الذي تخيَّله، استطاعت الإنتروبيا أن «تسير بالعكس» لتكوين جزيئات معقَّدة تحتوي على الكربون؛ أي الجزيئات العضوية. ويمكن أن تنمو مثل هذه الجزيئات على هيئة صفائح وقطرات متناهية الصغر أو حتى فقاعات صغيرة جوفاء، وهي الأشياء التي ربما تطوَّرت إلى خلايا. لم تحظَ جهود أوبارين بالاهتمام الكافي خارج حدود وطنه في ذلك الوقت، ولكن الباحث البريطاني جيه بي إس هولدين توصَّل بصورة مستقلة إلى الفكرة ذاتها في عام ١٩٢٩، وكأنما أراد أن يُثبت أن الوقت كان مواتيًا لها بالفعل. وكان هولدين (الذي، كما رأينا سابقًا، كان يتمتَّع بموهبة في ابتكار طرفات علمية لا تُنسى) هو مَن فكَّر في اسم جذَّاب لفكرة «البركة الصغيرة الدافئة» الافتراضية التي حدث فيها كل هذا، فأسماها الحساء البدائي. كانت الخطوة التالية هي محاولة إنتاج، أو إعادة إنتاج، الظروف التي كانت موجودةً في الحساء البدائي في المختبر. ولكن على الرغم من أن تلك التجارب كانت ناجحةً إلى حد ما، فقد أثارت تساؤلات جديدة، وطغت عليها مفاجأة أخرى، والتي أصبحت في حد ذاتها أحد أعمدة العلم.

العمود الرابع: مجرة درب التبانة مستودع المكوِّنات الأولية للحياة

بعد مُضي عَقدَين من الزمان على فرضية أوبارين، القائلة إن الحياة ربما نشأت في جو اختزالي على كوكب الأرض في بداية نشأته، ألقى هارولد يوري، أستاذ الكيمياء بجامعة شيكاغو، محاضرةً على طلابه حول ما أشار إليه باسم «فرضية أوبارين-هولدين». وكان من بين طلابه طالب حديث التخرُّج يُدعى ستانلي ميلر، كان لديه من الفضول ما دفعه للسؤال عن إمكانية نيل درجة الدكتوراه بالعمل على هذه الفكرة من خلال إنشاء تجربة لاختبار مدى صحتها؛ وذلك بعمل نموذج مُصغَّر لـ «بركة صغيرة دافئة» بداخل أوعية زجاجية مختبرية محكمة، تحوي مزيجًا من المواد التي أشار إليها كل من أوبارين وهولدين.

وافق يوري على الإشراف على التجربة، واشتُهرت النتائج التي توصَّلا إليها باسم تجربة ميلر-يوري.

كان محور التجرِبة دورقًا زجاجيًّا، سعة ٥ لترات، يحتوي على خليط من الميثان والأمونيا والماء وبخار الماء والهيدروجين. كان إمداد بخار الماء مستمرًّا دون انقطاع، وذلك بتوصيل دورق آخر من الماء المغلي سعة نصف لتر، بالدورق الأساسي عن طريق أنابيب، وكان البخار يمر عبر الدورق الأساسي ثم يتكثَّف، مع استمرار تصاعد الغازات الساخنة عبر غرفة للتبريد، وهي أنبوب منحنٍ على شكل حرف U، لتعود من جديد إلى دورق الغليان لإكمال دورتها. تُوفِّر انحناءة هذا الأنبوب حاجزًا يمكن احتجاز السائل فيه، ثم صرفه عبر صنبور. ولتوفير إمداد من الطاقة محاكيًا لحركة فعل البرق، كانت هناك شرارات كهربائية تومض عبر الخليط في الدورق الأساسي.



ستانلي ميلر. «ساينس فوتو لايبراري».

تضمَّن النموذج الأصلي للتجربة تصريف السائل المحتجز في الأنبوب المنحني وتحليله مرةً أسبوعيًّا. ولكن لم تستغرق التجربة أكثر من أسبوع واحد لإثبات نجاح مذهل لها، وجاءت نتائجها جديرةً بنيل درجة الدكتوراه عن استحقاق. ففي أقل من يوم تغيَّر لون السائل الموجود بالأنبوب المنحني إلى اللون الوردي. وعند تصريف السائل الناتج عن الأسبوع الأول وتحليله، وجد ميلر أن أكثر من عشرةٍ بالمائة من الكربون في خليط الغازات الأصلي المحتجَز داخل الدورق الذي سعته ٥ لترات، قد تحوَّل إلى مركبات عضوية. وكانت الأحماض الأمينية أهم هذه المركبات، وهي جزيئات عضوية معقَّدة تُعَد في حد ذاتها العناصر المكوِّنة للبروتينات، التي تُعَد البنى الأساسية للحياة. ولا يوجد سوى عشرين حمضًا أمينيًّا يتحد معًا بطرق مختلفة لتكوين جميع البروتينات التي توجد في جسمك. ونجحت تجربة ميلر-يوري في إنتاج ثلاثة عشر بروتينًا منها، خلال أسبوع واحد فقط. ونُشرت النتائج في دورية «ساينس» في عام ١٩٥٣. واعتُقِد أنهما على بعد خطوة واحدة فقط من تخليق الحياة ذاتها، وكرَّس ميلر مسيرته العلمية كاملة (إذ تُوفِّي عام ٢٠٠٧) لصقل تجربته وتطويرها، على مدار فترات أطول وأطول، أملًا في قطع هذه الخطوة الواحدة الناقصة. ولم يتزعزع عن موقفه عندما أعلن الجيولوجيون أن نشأة الأرض ربما لم تبدأ

بغلاف جوي اختزالي قط. وأفضل دليل على ذلك أن الغلاف الجوي الأولي لكوكبنا كان يتألَّف من خليط الغازات ذاته المنبعث من البراكين اليوم، وأبرزها ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين وثاني أكسيد الكبريت. واكتفى ميلر بتعديل أجهزته لتلائم هذا الخليط من المواد، وكرَّر المحاولة، ونجح مرةً أخرى في إنتاج مجموعة متنوِّعة من الجزيئات العضوية المعقَّدة من مواد أولية بسيطة. ويكفيه أنه قد أثبت أن تكوُّن جزيئات معقَّدة مثل الأحماض الأمينية من مركبات بسيطة يُعَد أمرًا سهلًا بل هو حتمي، شريطة وجود إمداد من الطاقة. ولكن المفارقة أنه لم يتكبَّد عناء محاولة تفسير كيفية وصول مثل هذه الجزيئات إلى الأرض. أمَّا المفاجأة الكبرى التي ظهرت من المشاهدات المرصودة بدايةً من أواخر القرن العشرين وحتى أوائل القرن الحادي والعشرين، والتي زعزعت فهمنا لنشأة الحياة على الأرض، فهي احتمالية أن تكون كيمياء البرك الصغيرة الدافئة التي كانت موجودةً على الأرض في بداية نشأتها، قد «بدأت» بمركَّبات تشبه الأحماض الأمينية.

لقد قطعنا شوطًا طويلًا بعد العمل الرائد الذي أنجزه علماء الكيمياء الحيوية في القرن التاسع عشر. وإذا رغب أحد ورثتهم اليوم في تصنيع الجزيئات الأساسية للحياة والبروتينات والحمضَين النوويَّين الشهيرَين المتمثلَين في الحمض النووي (دي إن إيه) والحمض النووي الريبي (آر إن إيه)، فلن يُكلِّف نفسه عناء البدء من خليط الغازات الذي كان يحتمل وجوده في الغلاف الجوي الاختزالي، أو حتى من خليط الغازات المنبعثة من البراكين اليوم.[1] أمَّا المواد الأولية الأكثر تعقيدًا وإثارةً للاهتمام مثل الفورمالدهيد والميثانول، فهي متاحة لدى مُورِّدي الكيماويات، ويمكن العثور عليها فوق رفوف أي من مختبرات الكيمياء الحيوية المجهَّزة جيدًا. ولا شك في أن سبب توفُّرها بسهولة يُعزى إلى أن أحدهم أخذ على عاتقه عناء تصنيعها عن طريق التخليق الكامل، على نطاق صناعي. والمفاجأة المذهلة هي أن الكون فعل الأمر ذاته، على نطاق أوسع بكثير، ولعدد كبير من المركَّبات الأولية للحياة.

بدأت القصة في ثلاثينيات القرن الماضي بعدما عُثر على أبسط المركَّبات الجزيئية المكوَّنة من الكربون والهيدروجين (CH)، والكربون والنيتروجين (CN)، في سحب من الغاز والغبار في الفضاء (السُّدُم) باستخدام التحليل الطيفي. لكنها لم تُثِر أي اهتمام إلا في ستينيات القرن الماضي، عندما سمحت التقنيات الحديثة بتوسيع نطاق الأطوال الموجية التي يمكن فحصها بهذه الطريقة. فالجزيئات الصغيرة، مثل أول جزيئَين في الفضاء جرى التعرُّف عليهما، تُنتج خطوطًا في نطاق الجزء المرئي من الطيف الضوئي.

أمَّا الجزيئات الكبرى فتُنتج سمات متكافئةً في الطيف عند أطوال موجية أكبر، في نطاق الأشعة تحت الحمراء والموجات اللاسلكية من الطيف. لذا كان لا بد من انتظار ظهور التقنية المناسبة للتعرُّف عليها، وتجلَّت هذه التقنية في هيئة تلسكوبات لرصد الأشعة تحت الحمراء والتلسكوبات اللاسلكية أو الراديوية، لصياغة التعريفات الدقيقة لها. وحتى في ذلك الحين، استغرق علماء الفلك وقتًا حتى أدركوا ماهية ما يرونه؛ إذ لم يتوقَّع أحد العثور على جزيئات معقَّدة في الفضاء. وفجأةً ظهرت نقطة مضيئة جعلتهم يدركون الأمر، وبدءوا في البحث بدأب عن جزيئات في الفضاء، بحثًا عن أنواع أكبر وأكثر تعقيدًا، في سباق للعثور على الجزيء الذي يحوي أكبر عدد من الذرات المرتبطة معًا.

كان الجزيء الثالث الذي عُثر عليه في الفضاء هو الجزيء المسمَّى بجذر الهيدروكسيل (OH)، وجرى التعرُّف عليه في عام ١٩٦٣. غير أن جميع الأنظار اتجهت إلى الاكتشاف التالي الذي أعُلن عنه في عام ١٩٦٨. وكان هذا الجزيء هو جزيء الأمونيا رباعي الذرات (NH_3). وكانت تلك الدلالة الأولى على إمكانية اتحاد أكثر من ذرتَين معًا في ظروف الفضاء بين النجمي لتكوين جزيئات. وكان الماء (H_2O) من بين الجزيئات الثلاثية الذرات الأولى التي جرى التعرُّف عليها، ولكن جاءت الإثارة الكبرى باكتشاف الفورمالدهيد (H_2CO)، أول مركب عضوي يُعثر عليه في الفضاء. وجرى التعرُّف على بضع مئات من الجزيئات بين النجمية، من بينها اليوريا[٢] والكحول الإيثيلي. كان اكتشاف الكحول الإيثيلي أمرًا مثيرًا للاهتمام بصورة خاصة، ليس لأنه أعطى كتَّاب المقالات في الصحف الشهيرة فرصةً للإشارة إلى وجود سحب من «الفودكا في الفضاء» فحسب، وإنما لأن كل جزيء يتألَّف من تسع ذرات (CH_3CH_2OH). يوجد بضع جزيئات جرى التعرُّف إليها بصورة حاسمة ودقيقة، يتألَّف كلٌّ منها من عشر ذرات أو أكثر، ولكن يظل الجلايسين (H_2NH_2CCOOH) أحد الجزيئات المثيرة للاهتمام بشكل خاص. فالجلايسين هو حمض أميني، ويُعَد إحدى اللبنات الأساسية للبروتينات. وما استطاع ميلر فعله في دورق سعته ٥ لترات داخل مختبره، يمكن للكون فعله في سحب غازية هائلة في الفضاء.

ثمة اكتشاف آخر مهم لجزيء مُكوَّن من اثنتَي عشرة ذرة، يُسمَّى سيانيد الآيزوبروبيل (($(CH_3)_2CHCN$))، الذي جرى التعرُّف عليه في عام ٢٠١٤. وهذا مهم لأن الرمز $(CH_3)_2$ يعني وجود وحدتَين CH_3 منفصلتَين تتفرَّعان من ذرة الكربون ذاتها، وهذه البنية مشابهة لبنية العديد من الجزيئات المعقدة التي ساهمت في تشكيل الحياة على كوكب الأرض، ويشمل ذلك بعض الأحماض الأمينية. وبعد مرور عامَين، وتحديدًا في عام ٢٠١٦، رصد علماء

الفلك جزيء أكسيد البروبيلين (CH_3CHCH_2O) المكوَّن من عشر ذرات، في سحابة من الغاز والغبار تسمَّى القوس بي-٢ (Sagittarius B2). والسمة المثيرة للاهتمام في هذا الجزيء هي امتلاكه خاصيةً تُدعى الكيرالية أو عدم التناظر المرآتي، وهذا بالأساس يعني الانطباقية. ويوجد بصورة طبيعية في هيئة جزيئات تدور جهة اليسار وأخرى تدور جهة اليمين، ولكن عُثر على نوع واحد فقط في عام ٢٠١٦. تتميَّز الجزيئات اللولبية بخاصية الكيرالية أو عدم التناظر؛ إذ بإمكانها الالتفاف إمَّا يسارًا وإمَّا يمينًا. وتنقسم الحياة على الأرض بدقة إلى كلا النوعَين من الكيرالية. فالأحماض الأمينية تكاد تدور بأكملها جهة اليسار، بينما يدور لولبا الحمض الريبي والحمض النووي جهة اليمين. وأكسيد البروبيلين المرصود في السحب مثل القوس بي-٢، سيُحدِّد كيرالية هذه السحب من خلال تأثير الضوء[٣] المنبعث من النجوم، الذي يسمح بدمغ نوع واحد فقط من الانطباقية على الجزيئات داخل سحابة واحدة من الغاز والغبار، على الرغم من أن المشاهدات ليست تفصيليةً بالدرجة الكافية لتحديد أي جهة ستغلب في هذه الحالة. ونظرًا إلى أن النجوم والكواكب تتشكَّل من مثل هذه السحب، فإن المعنى الضمني هو أن الانطباقية قد دُمغت بالفعل في مكوِّنات الحياة قبل حتى أن تصل إلى سطح الكوكب. وعليه، ستكون جميع الأنظمة الكوكبية التي تتكوَّن من السحابة نفسها، لها خاصية الانطباقية ذاتها. ولكن كيف تتشكَّل هذه الجزيئات بالضبط في الفضاء، وكيف يمكنها الوصول إلى سطح كوكب ما؟

لعل ذكر «الغبار» عند الحديث عن السحب بين النجمية يُثير في ذهنك صورةً غير صائبة تمامًا. تُوضِّح الدراسات التي أُجريت على الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من هذه السحب عبر نطاق واسع من الأطوال الموجية، أن الغبار يتكوَّن من جسيمات دقيقة، تشبه الجسيمات المنبعثة من دخان السجائر. وتتألَّف تلك الجسيمات من مواد مثل الكربون، وأكاسيد السيليكون، ويُغطيها جليد مكوَّن من الأمونيا والميثان المتجمِّدَين، بالإضافة إلى الجليد المائي المتعارف عليه. فإذا تصادف اصطدام ذرتَين أو جزيئَين صغيرَين، أو جزيء كبير وآخر صغير في الفضاء، فأغلب الظن أنهما سيرتدَّان أو ينشطران عند اصطدام بعضهما ببعض. لكن الأسطح الجليدية لحبيبات الغبار تُوفِّر مواضع يمكن للذرات والجزيئات الالتصاق بها. وعندما تلتصق المواد البسيطة بالجليد، يكون أمامها فرصة للاتحاد معًا لتكوين مواد أكثر تعقيدًا تُفلت من الجليد فيما بعد، وهو ما قد يحدث عندما تُشارك الحبيبات نفسها في اصطدامات، أو نتيجةً لتأثير الأشعة الكونية، أو بفعل الجسيمات السريعة الحركة المقذوفة خلال النشاط النجمي. اختُبرت هذه الأفكار داخل

المختبر بتبريد الجسيمات الجليدية المماثلة لتلك الموجودة في الفضاء، حتى سالب ٢٦٣ درجة مئوية لمحاكاة برودة الفضاء، وغمرت في الأشعة فوق البنفسجية لمحاكاة الطاقة التي تُوفِّرها النجوم. وتحدث التفاعلات الكيميائية على أسطح الحبيبات بالطريقة التي وضَّحتها بالضبط.

لا تحدث هذه العملية بسرعة كبيرة. فتكوُّن جزيئات معقَّدة مثل الجلايسين أو سيانيد الأيزوبروبيل يستغرق وقتًا طويلًا. لكن كان هناك متسع من الوقت لذلك. فعمر الكون يبلغ نحو ١٣٫٨ مليار سنة، وعمر مجرتنا درب التبانة أقل من ذلك بقليل. حتى عمر المجموعة الشمسية والأرض ذاتها يبلغ نحو ٤٫٥ مليارات سنة. وأوضحت بقايا الأحفوريات أن أشكال الحياة الوحيدة الخلية وُجدت على الأرض منذ ٣٫٨ مليارات سنة على الأقل، والأمر المحيِّر هو الكيفية التي أتاحت لمواد مثل ثاني أكسيد الكربون، والماء، وثاني أكسيد الكبريت، إنتاج أنماط حياة مماثلة في وقت قصير كهذا، من العدم. لكن ما هو محيِّر أيضًا الكيفية التي أتاحت لمثل هذه المواد الأولية، بالإضافة إلى الميثان والأمونيا، إنتاج مركَّبات مثل الجلايسين أو سيانيد الأيزوبروبيل في غضون عشرة مليارات سنة أو أكثر؛ أي أكثر من ضعف العمر الحالي للأرض.

كم تبلغ كمية المواد العضوية المعقَّدة التي قد توجد في الفضاء؟ تحتوي مجرتنا درب التبانة على مئات الملايين من النجوم التي تشبه شمسنا بصورة أو بأخرى، وتشير مجموعة متنوِّعة من عمليات الرصد الفلكية إلى أن كتلة جميع الغاز والغبار الموجودَين بين النجوم تبلغ نحو ١٠ بالمائة من كتلة جميع النجوم. وهذا يعني ١٠ ملايين ضعف كتلة الشمس على الأقل. ويمكننا إدراك ما يحدث عندما تتجمَّع مثل تلك السحب المكوَّنة من الغاز والغبار معًا عن طريق الجاذبية لتكوين نجوم وكواكب جديدة.

ثمة نظام يُعرف باسم «آي آر إس ٤٦»، يوجد به قرص ضخم من المواد مغطًّى بالغبار ويُحيط بنجم حديث النشأة. وهذا يشبه سحابة المواد التي تكوَّنت منها الأرض والكواكب الأخرى حول الشمس في بداية نشأتها حسبما يُعتقد، ويمكن دراستها تفصيليًّا نظرًا إلى قربها النسبي منَّا؛ إذ تبعد عنا مسافة ٣٧٥ سنةً ضوئيةً فقط. يحتوي القرص على تركيزات عالية من سيانيد الهيدروجين والأسيتيلين. وعند استخدام هذَين المركبَين، بالإضافة إلى الماء، في التجارب المختبرية التي تحاكي ظروف الفضاء، فإنها تتفاعل لتنتج الأحماض الأمينية. وفي عام ٢٠١٩ أعلن علماء وكالة ناسا أنه بتحليل البيانات الواردة من مسبار كاسيني الفضائي، اتضح لهم وجود وحدات بناء للحياة في فُوَّهات نشطة تقذف

المياه من المحيطات المغطاة بالجليد في إنسيلادوس، أحد أقمار كوكب زحل. تستمد هذه الوحدات طاقتها من مصادر مائية حرارية تقع في عمق الجليد. تنبعث المادة من باطن القمر بقوة عبر فُوَّهات مائية حرارية، وتمتزج مع ماء المحيط الضخم المغطَّى بالجليد على سطح القمر، قبل إطلاقه في الفضاء عبر الينابيع الحارة الضخمة المتفجِّرة عبر الجليد على هيئة بخار ماء وحبيبات جليدية. تتكثَّف الجزيئات فوق حبيبات الجليد، وكشفت أجهزة الرصد الموجودة على متن مسبار كاسيني أنها مركَّبات محمَّلة بالنيتروجين والأكسجين، شبيهة بتلك التي تظهر في الأقراص المغطاة بالغبار الموجودة حول النجوم الحديثة النشأة. وهذا يوافق ما أثبته ستانلي ميلر خلال مسيرته المهنية الطويلة، من أن تكوُّن جزيئات معقَّدة مثل الأحماض الأمينية من مركَّبات بسيطة يُعد أمرًا سهلًا، بل هو حتمي، شرط وجود إمداد من الطاقة.

وباعتبارها الوحدات البنائية للبروتينات، تُشكِّل الأحماض الأمينية نصف قصة نشأة الحياة. أمَّا النصف الآخر من القصة فيتمثَّل في الحمض النووي والحمض النووي الريبي. ولكن لم يُكشف بعدُ عن وجودهما في الفضاء. بيد أنه كُشف مجدَّدًا عن وجود وحداتها البنائية.

والمكوِّن الأساسي لكلٍّ من الحمضَين النوويَّين هو سكر يُسمَّى بالريبوز. يتكوَّن كل جزيء من جزيئات الريبوز حول حلقة خماسية الذرات، مكوَّنة من أربع ذرات كربون، وذرة أكسجين واحدة، يمكنها الاتحاد مع مواد أخرى خارج الحلقة. ترتبط كل ذرة من ذرات الكربون الثلاث في سكر الريبوز بذرة هيدروجين، ومجموعة هيدروكسيل (OH) خارج الحلقة. ولكن في سكر الريبوز منقوص الأكسجين، ترتبط إحدى ذرات الكربون الثلاث بذرتَي هيدروجين فقط، فتُنتقص ذرة أكسجين من الجزيء بأكمله. فسكر الريبوز منقوص الأكسجين هو ريبوز ينقصه ذرة أكسجين واحدة، ومن هنا جاءت تسميته.[٤]

يحتوي القوس بي-٢ على الوحدات البنائية الأساسية للأحماض النووية بين مخزونه من المركَّبات الكيميائية. وتُعَد جزيئات سكر الجليكو ألدهيد ($HOCH_2-CHO$) من بين الجزيئات الموجودة في السحابة، ومن المعروف أنها تتفاعل بشدة مع مركبات الكربون الأخرى لتكوين الريبوز. لعلها مبالغة بعض الشيء أن نقول إننا عثرنا على الوحدات البنائية لكلٍّ من الحمض النووي والحمض النووي الريبي في الفضاء، لكننا بالتأكيد وجدنا الوحدات البنائية المكوِّنة لوحداتهما البنائية، وفي تطوُّر هام أُعلن عنه في عام ٢٠١٩، أعلن فريق بقيادة ياشوهيرو أوبا أنهم نجحوا في تصنيع مكوِّنات الحمض النووي في تجربة

مختبرية صُممت لمحاكاة الظروف الموجودة في السحب بين النجمية. وكما صرَّح جيم لوفلوك مبتكر نظرية جايا: «يبدو الأمر كما لو أن مجرتنا كانت مستودعًا عملاقًا يحوي قطع الغيار اللازمة للحياة.» ولكن حتى لو كانت قطع الغيار اللازمة للحياة موجودةً بوفرة في الفضاء، وخاصةً في حلقات الغبار الموجودة حول النجم «آي آر إس ٤٦»، فكيف وصلت هذه الوحدات البنائية إلى الأرض عندما كان كوكبنا لا يزال حديث النشأة؟

إن الجليد الذي يُغطِّي حبيبات الغبار في الفضاء، ويُوفِّر ملاذًا يمكن للجزيئات العضوية أن تنمو فيه، يُعَد أيضًا دليلًا على الطريقة التي يمكن أن تتشكَّل بها الكواكب مثل كوكب الأرض. فعندما يتشكَّل نجم نتيجة انهيار سحابة ضخمة من الغاز والغبار، حينما تبدأ الجاذبية بجذب المادة معًا يتخلَّف بعض الغبار في هيئة حلقة، مثل تلك المحيطة بالنجم «آي آر إس ٤٦». مثل هذا الانهيار لا يكون متماثلًا تمامًا؛ لأن كل شيء يدور بطريقة أو بأخرى؛ لذلك يستقر الغبار على هيئة حلقة تدور حول النجم الأم. فلو كان مكوَّنًا من غبار فقط لظل على هذا الحال على الأرجح. ولكن نظرًا إلى أن الحبيبات مغطاة بالجليد، فإنها تكون لزجةً وتميل إلى الالتصاق بعضها ببعض عند الاصطدام، ممَّا يؤدِّي إلى تكوين كتل أكبر وأكبر حتى تصبح كبيرةً بما يكفي لجذب حبيبات أخرى إليها. بعد ذلك يمكن أن تتجمَّع الكتل معًا لتكوين قطع صخرية تصطدم وتندمج معًا بدورها، وتشكِّل قطعًا صخريةً أكبر، وتزداد حتى تصبح كواكب. أمَّا المراحل الأخيرة من هذه العملية فهي عنيفة للغاية، وفيها يُحتمل اصطدام الكويكبات الكبيرة كالمريخ بعضها ببعض لتكوين كواكب كاملة في شكل كرات من الصخور المنصهرة. وبحلول ذلك الوقت تكون جميع المواد العضوية الموجودة في الحبيبات الأصلية التي كوَّنت الكوكب — لنُسمِّه الأرض — قد دُمرت بفعل الحرارة. ولكن حتى بعد تكوُّن الأرض كانت لا تزال هناك كتل ضخمة من المواد الصخرية، والكثير منها يحوي كميات كبيرةً من الجليد، من نوع أو آخر، ومواد يُغطِّيها الغبار حول الشمس حديثة النشأة.

تحوَّلت الكتل الجليدية إلى مذنبات، وتسبَّبت جاذبية كوكب المشتري في قذف كلٍّ من المذنبات والكتل الصخرية التي تحتوي على القليل من الجليد، أو لا تحتوي على أي جليد على الإطلاق، إلى مدارات إهليجية سحبتها إلى الجزء الداخلي من المجموعة الشمسية، حيث الأرض الحديثة النشأة، التي كانت جدباء وتفتقر إلى غلاف جوي، في طور التصلُّب والبرودة. ونتج عن ذلك عدد هائل من التصادمات على سطح الأرض، كانت بالغة الأثر للحد الذي جعل علماء الفلك يُشيرون إليها باسم «القصف الشديد المتأخِّر». ومن بين أمور

أخرى كان القصف الشديد المتأخِّر هو المسئول عن المظهر المحطَّم الذي يبدو عليه سطح القمر، الذي كان يدور بالفعل حول الأرض حينذاك. ويكشف تحليل نمط الفُوَّهات القمرية وتأريخ صخور القمر عن معلومات حول القصف الشديد المتأخِّر، الذي استمرَّ لبضع مئات من ملايين السنين، حتى نفد معظم الحطام الموجود في المجموعة الشمسية الداخلية المتبقي من تكوين الكواكب. وقد انتهى قبل أقل من ٤ مليارات سنة. وفي غضون أقل من ٢٠٠ مليون سنة أخرى نشأت على الأرض الحياة القائمة على البروتين والحمض النووي، وذلك بفضل أمطار لطيفة محمَّلة بمواد متساقطة من الفضاء، واستمرَّت في التساقط على كوكبنا في أعقاب القصف الشديد المتأخِّر.

جلبت المذنبات كلًّا من الماء والكائنات الحية، أو على الأقل أسلاف الكائنات الحية، إلى الأرض. وتخبرنا نماذج المحاكاة الحاسوبية لهذه الأحداث أنه في أثناء القصف المذنَّبي أطلق نحو عشرة أضعاف كمية المياه الموجودة في المحيطات اليوم، وألف ضعف حجم الغاز الموجود في الغلاف الجوي في يومنا هذا. وساهم ذلك في تبريد الكوكب، بينما تسرَّبت بعض المواد المتطايرة إلى الفضاء، مثل الماء وثاني أكسيد الكربون والميثان. ولكن نظرًا إلى أن سطح الأرض قد تضرَّر بفعل التصادمات، في عملية يُشار إليها بيانيًّا باسم «حرث الاصطدام»؛ فقد امتزجت بعض المواد مع المادة الأصلية للسطح لتُشكِّل الصخور الغنية بالمواد المتطايرة التي تُعَد من المحتويات النمطية للقشرة الأرضية اليوم. وفور تشكُّل الغلاف الجوي والمحيطات، باتت الأرض مستعدةً لاحتضان الحياة. وسرعان ما بُذِرت فيها مكوِّنات الحياة.

بالإضافة إلى المذنبات التي اصطدمت بعنف بالأرض حديثة النشأة، كان هناك العديد من الأجسام المماثلة الأخرى التي اجتازت الجزء الداخلي من المجموعة الشمسية، وتبخَّرت تدريجيًّا بفعل حرارة الشمس. وتلك هي العملية التي تمنح المذنبات أذيالها المميِّزة لها اليوم، على الرغم من وجود مذنَّبات أخرى لها أذيال أكثر تميُّزًا، عندما كانت الأرض والمجموعة الشمسية لا تزالان حديثتَي النشأة. وبعد مُضي ٤ مليارات سنة كانت أغلب المذنَّبات الموجودة داخل المجموعة الشمسية قد تبخَّرت منذ فترة طويلة. ولكن هذا هو سبب وجودنا هنا على الأرض. فذيل المذنب هو عبارة عن تيار من الغاز والغبار يتسرَّب من النواة الجليدية في أثناء تبخُّر المذنب. يُترك ذلك الغبار في مسار حول مدار المذنب، وحتى يومنا هذا غالبًا ما تشهد الأرض مثل هذا التدفُّق من غبار المذنَّبات، وهو ما ينتج عنه زخات الشهب التي تكون في هيئة جسيمات دقيقة بحجم حبيبات الرمل تقريبًا، تحترق في الغلاف الجوي. ولكن هناك أيضًا جسيمات ذات بنية أكثر انفتاحًا، مثل ندف الثلج التي تهبط عبر

الغلاف الجوي للأرض وتستقر على سطح كوكب الأرض. وتحمل معها المزيج ذاته من المواد العضوية التي تُرَى (باستخدام التحليل الطيفي) في أذيال المذنبات، وتربط السحب العملاقة التي تتكوَّن منها أنظمة الكواكب. وقد جرى جمع عينات من هذه المواد باستخدام طائرات تُحلِّق على ارتفاعات عالية، ومناطيد تصل إلى طبقة الستراتوسفير. يُوضِّح مقدار العينات المُجمَّعة أن هذه العملية حتى في يومنا هذا تنقل إلى سطح الأرض نحو ٣٠٠ طن من المواد العضوية — جزيئات متعدِّدة الذرات تحتوي على الكربون — كل عام.

وكما أشار داروين لا يوجد احتمال لتطوُّر هذه المادة إلى كائن حي اليوم. فبادئ ذي بدء، يُدمَّر الكثير منها من خلال تفاعلات مع الأكسجين في الغلاف الجوي، ويدخل المتبقي منها إلى السلسلة الغذائية للكائنات الحية. لكن لم يكُن هناك وجود للأكسجين، ولا الكائنات الحية، حينما أصبحت الأرض باردةً وتشكَّل لها محيط وغلاف جوي. إذن ما مقدار المادة المذنَّبية التي تسبَّبت في بدء ظهور الحياة؟

يستمد علماء الفلك فكرةً تقريبيةً من أمور مثل دراسة الفُوَّهات الموجودة على سطح القمر، وتحليلات مدارات المذنبات في الوقت الحالي، ونماذج المحاكاة الحاسوبية لديناميكيات المجموعة الشمسية حديثة النشأة. وتُشير تقديراتهم إلى أنه على مدار نحو ٣٠٠ ألف سنة، بدءًا من نهاية القصف الشديد المتأخِّر، كانت كمية المواد العضوية التي تساقطت على الأرض مماثلةً للقدر الموجود داخل جميع الكائنات الحية على الأرض في العصر الحاضر. وبدايةً من وقت انتهاء القصف الشديد المتأخِّر، وحتى الوقت الذي تأكَّدنا فيه من وجود حياة على الأرض؛ أي نحو ٢٠٠ مليون سنة، لو أمكن الحفاظ على جميع المواد العضوية التي سقطت وانتشرت بالتساوي على سطح الكوكب، لتكوَّنت طبقة تحتوي على ٢٠ جرامًا من المواد العضوية فوق كل سنتيمتر مربع من سطح الأرض، وربما اشتملت على الأحماض الأمينية وسكر الريبوز. وهذا يُعادل محتويات عبوة سعة ٢٥٠ جرامًا من الزبْد القابل للدهن مفرودةً على كل رقعة مساحتها ٣٫٥ × ٣٫٥ سنتيمتر مربع من سطح الأرض. لا عجب أن الحياة قد بدأت بهذه السرعة، وفور ظهور أول شكل للحياة على سطح الأرض، لا بد أنه قد توافرت لها الكثير من الأشياء لتتغذَّى عليها على مدار الألفيات الأولى.

أصبح ذلك الآن عمودًا من أعمدة العلم. لقد بُذِرت الأرض في بداية نشأتها بالمواد الخام للحياة من المخزون الكوني الذي أشار إليه لوفلوك. ولكن ثمة فكرة أكثر مدعاةً للتأمُّل، ربما تكون اليوم في مكان ما بين المرحلتَين الأولى والثانية من تصنيف هولدين. لا يوجد سبب للشك في وجود الأحماض الأمينية و(ربما) الريبوز في السحب بين النجمية.

هل من الممكن أن تكون الأجسام قد انتقلت إلى مرحلة أخرى أبعد لإنتاج البروتينات والأحماض النووية داخل المذنبات؟ الفكرة ليست مجنونةً مثلما قد يتبادر إلى ذهنك؛ لأن المحفِّز الذي يتسبَّب في انهيار سحابة من الغاز والغبار لتكوين النجوم والكواكب غالبًا ما يكون من المستعرات العظمى، ما يعني أنه انفجار نجمي. وينتج عن ذلك عناصر مشعة، وفي السحابة يمكن للكتل الجليدية المكوَّنة من المواد الممتزجة بالعناصر المشعة أن تصبح دافئةً بما يكفي لإذابة الماء الكامن بها، من خلال الحرارة الناتجة عن التحلُّل الإشعاعي. فهل من الممكن أن تكون برك داروين الصغيرة الدافئة قد وُجدت في هذه الكتل الجليدية، حتى قبل أن تتشكَّل الأرض؟ يمكنك أن تُقرِّر بنفسك ما إذا كان هذا التخمين (١) هراءً لا قيمة له؛ أو (٢) وجهة نظر مثيرةً للاهتمام، ولكن لا أساس لها من الصحة. ولكن إن صح ذلك فهذا يعني أنه على الأقل في جوارنا الكوني القريب، ستعتمد الحياة في الكواكب الأخرى على النوع نفسه من البروتينات والأحماض النووية الذي نعتمد عليه.

ولكن حتى من دون الذهاب إلى هذا الحد يمكننا التيقُّن من أن أي كواكب شبيهة بالأرض ستحوي سلائف حياة مماثلة لتلك التي نعلم بوجودها في السحب بين النجمية. من الصعب علينا إدراك سبب فشل ظهور الحياة في ظل هذه الظروف؛ لأننا لا نعرف بالضبط كيف تحدث خطوة الانتقال من غير الحي إلى الحي، لكن الحقيقة أنها قد حدثت بسرعة كبيرة على الأرض، تُشير إلى أنها ليست بالخطوة الصعبة. وهذا دليل قوي على أن جوردانو برونو كان مُحقًّا، فلعل هناك بالفعل وفرةً من الكواكب الأخرى مثل كوكبنا، يحوي كلٌّ منها أشكالًا للحياة، وتتكوَّن من المادة ذاتها التي نتكوَّن منها.

وهو ما يثير تساؤلًا آخر. كيف اخترقت الذرات المكوِّنة للجزيئات العضوية — مثل الكربون والنيتروجين والأكسجين والهيدروجين — سحب الغاز والغبار الموجودة في الفضاء؟ تُقدِّم انفجارات المستعرات العظمى جزءًا من الإجابة عن هذا التساؤل. لكن قبل أن تتمكَّن تلك الانفجارات من أداء دورها، كان لا بد من حدوث تفاعلات نووية معقَّدة داخل النجوم، وتتوقَّف تلك التفاعلات على عمود آخر من أعمدة العلم، في مصادفة مدهشة تكاد تتنافى مع العقل.

هوامش

(١) بعد أن انتهيت من كتابة هذا الجزء في خريف عام ٢٠١٩، اندهشت حين أعلن باحثون من جامعة لودفيج ماكسيميليان في ميونخ بألمانيا، عن نتائج تجارب مختبرية

أجريت مؤخَّرًا، ثبت فيها تكوُّن جزيئات عضوية معقَّدة من مكوِّنات مثل الماء والنيتروجين. البعض يهوى الشقاء بلا طائل.

(٢) رُصدت في عام ٢٠١٤، وتأكَّد إنتاجها في السحب بين النجمية، دون الحاجة إلى استخدام كُلٍّ سواء لإنسان أو حيوان.

(٣) للعقليات المنشغلة بالأمور التقنية ضوء مستقطب استقطابًا دائريًّا.

(٤) سأستفيض في تناول تركيب الحمض النووي والحمض النووي الريبي في معرض مناقشتي للعمود السادس.

العمود الخامس:
مصادفة الكربون

بمزيج من التحليل الطيفي وفهم لفيزياء المكوِّنات الداخلية للنجوم، تبيَّن لنا أن نجمًا بحجم الشمس مثلًا يتكوَّن بالكامل تقريبًا من الهيدروجين والهيليوم، مع نسبة ضئيلة من عناصر أثقل (انظر العمود الثاني). وفي قلب النجم لا تكون هذه العناصر على هيئة غازات، كما من شأنها أن تكون على كوكب الأرض في العصر الحالي. فقد انتُزِعت الإلكترونات من أنويتها التي تنضغط معًا عند الوصول إلى كثافات هائلة، مع غياب المساحة الفارغة التي تشكِّل المادة الذرية المعتادة (العمود الأول). ومن خلال عمليات الرصد لسُحُب الغاز في الفضاء يتضح لنا أن تكوينها متشابه، على الرغم من وجود العناصر في حالتها الذرية المألوفة، مع الغبار الذي يمثِّل أهميةً بالغةً للحياة كما نعرفها، والذي يمثِّل مجرَّد جزء ضئيل من النسبة الإجمالية للمواد الموجودة في مجرة مثل مجرة درب التبانة. وربما توجد مواد أخرى تساهم في إجمالي كتلة الكون تُسمَّى المادة المظلمة والطاقة المظلمة، ولكن هذا خارج نطاق موضوع هذا الكتاب. ما يهمنا هنا هو نوعية المادة التي نتكوَّن منها، العناصر الكيميائية التي تعلمناها في المدرسة، التي يُشير إليها علماء الفيزياء بالمادة الباريونية. من أين جاءت هذه المادة؟

ثمة كم هائل من الأدلة على أن الكون كما نعرفه الآن نشأ من حالة ساخنة جدًّا وشديدة الكثافة، تُعرف باسم الانفجار العظيم، الذي وقع قبل ١٣٫٨ مليار عام مضى. جزء من هذه الأدلة يعود إلى مشاهدات تفيد بأن الكون يتمدد اليوم؛ ومن ثم فلا بد أنه كان أكثر انضغاطًا في الماضي، بينما يأتي جزء آخر من دراسات أُجريت على الضوضاء الراديوية التي خلَّفتها كرة النار البدائية (أو ما يُسمَّى بإشعاع الخلفية الكوني الميكروي)،

وجزء ثالث يعود إلى فهمنا لقوانين الفيزياء. نعرف من أساسيات علم الفيزياء أن المادة الباريونية الأولى الناتجة من الطاقة المنبعثة من الانفجار العظيم، وفقًا لمعادلة أينشتاين الشهيرة، تمثَّلت في عنصر الهيدروجين، الذي يُعَد أبسط العناصر وأخفها. ونعرف أيضًا من هذه المعادلات أنه عندما تمدَّد الكون وفقد الحرارة، تحوَّل نحو ٢٥ بالمائة من ذلك الهيدروجين إلى هليوم من خلال تفاعلات الاندماج النووي، بينما كان الكون الحديث النشأة لا يزال ساخنًا. ولكن بعد مرور نحو ثلاث دقائق، انخفضت درجة حرارة كرة النار التي وُلد الكون بداخلها إلى حد تعذَّر معه حدوث المزيد من التفاعلات النووية، تاركةً سحبًا هائلةً تتكوَّن من مزيج من الهيدروجين والهيليوم، المادة الخام للنجوم والمجرات الأولى، والتي تحرَّكت بعيدًا بعضها عن بعض في الكون المتمدِّد. ولا يتطلَّب الأمر قفزةً فكريةً هائلةً لإدراك أن العناصر الأخرى لا بد أنها قد تكوَّنت في وقت لاحق داخل النجوم. ولكن كيف حدث هذا بالضبط؟

لكي نضع الأمور في نصابها الصحيح، وندرك الكمية الكبيرة (أو الضئيلة!) للمواد التي نتحدَّث عنها، يمكننا أن نلقي نظرةً على تركيب المجموعة الشمسية، التي تُمثِّل ما نتوقَّع العثور عليه في الأنظمة الكوكبية التي تدور حول النجوم الأخرى. كما رأينا في موضع سابق من هذا الكتاب، تتكوَّن الشمس، من حيث الكتلة، من ٧١ بالمائة من عنصر الهيدروجين، و٢٧ بالمائة من عنصر الهيليوم، وأقل من ٢ بالمائة من باقي العناصر الأخرى مجتمعة. أمَّا من حيث العدد الذري يُشكِّل الهيدروجين ٩١٫٢ بالمائة من الشمس، والهيليوم ٨٫٧ بالمائة، أمَّا باقي العناصر الأخرى فتُكوِّن ٠٫١ بالمائة فقط. ولكن عندما كانت الشمس حديثة النشأة، تناثرت الكثير من المواد الخفيفة بعيدًا عن القرص الغباري الذي تشكَّلت بداخله الكواكب بفعل حرارة النجم الحديث النشأة. وتكوَّنت الكواكب بما تبقَّى من عناصر، وكذلك نحن أنفسنا. بالنظر إلى المجموعة الشمسية ككل، ومن حيث الكتلة، يُسهم الهيدروجين بنسبة ٧٠٫١٣ بالمائة، والهيليوم بنسبة ٢٧٫٨٧ بالمائة، والأكسجين — العنصر الأكثر شيوعًا من حيث الكتلة — بنسبة ٠٫٩١ بالمائة؛ نظرًا إلى أن بعض العناصر الخفيفة قد فُقدت. وعلى الرغم من أهمية الهيدروجين في كيمياء الحياة (تذكَّر العناصر الأربعة الموجودة في جميع الكائنات الحية: الكربون والهيدروجين والأكسجين والنيتروجين)، فلا يوجد أي غموض حول منشئه؛ ولذا يمكننا أن نُنحيه جانبًا ونلقي نظرةً على نسبة العناصر الثقيلة نسبيًّا من تركيب المجموعة الشمسية التي تبلغ ٢ بالمائة؛ ونظرًا إلى أن كمياتها ضئيلة جدًّا فمن المنطقي أن نتحدَّث من منطلق عدد الذرات، لا من منطلق الكتلة.

لنأخذ العناصر العشرة الأولى فقط، ولكن دون أن نحاول إعطاء أرقام دقيقة لكميات الهيدروجين والهيليوم (أول عنصرَين)؛ ففي مقابل كل ٧٠ ذرة أكسجين نجد ٤٠ ذرةً من الكربون، وتسع ذرات من النيتروجين، وخمس ذرات من السيليكون، وأربع ذرات من كل من الماغنسيوم والنيون، وثلاث ذرات من الحديد، وذرتَين من الكبريت. يوجد خمسة عناصر فقط (وهي الألومنيوم، والأرجون، والكالسيوم، وسبائك النيكل والحديد، والصوديوم) التي تتراوح وفرتها بين ١٠ و٥٠ بالمائة من وفرة الكبريت. وجميع العناصر الأثقل من ذلك أكثر ندرةً بكثير. ففي مقابل كل ١٠ ملايين ذرة كبريت، على سبيل المثال، يوجد ثلاث ذرات ذهب فقط، وهذا أحد الأسباب التي تجعل الذهب عنصرًا قيمًا، وهذا يخبرنا بحقيقة عميقة عن الكون سوف أتناولها بعد قليل.

نجد أول مفتاح لحل لغز كيفية تشكيل العناصر داخل النجوم في قائمة العناصر العشرة الأولى — أو على الأقل العناصر الأثقل من الهيليوم الموجودة في هذه القائمة. فنواة ذرة الهيليوم (على وجه التحديد ذرة نظير الهيليوم-٤) تناظر جسيم ألفا، الذي يتكوَّن من بروتونَين ونيوترونَين. وتتكوَّن نواة ذرة الكربون من ستة بروتونات وستة نيوترونات، كأنها ثلاثة جسيمات ألفا ملتصقة بعضها ببعض، وهو ما يُعطيها اسم نظير الكربون-١٢. وإضافة جسيم ألفا آخر يعطينا الأكسجين. ولكلٍّ من النيتروجين والسيليكون والماغنيسيوم والنيون والحديد نواة تحتوي على أعداد صحيحة من جسيمات ألفا. فإذا أمكن إضافة جسيمات ألفا إلى النَّوَى بداخل النجوم، فستتكوَّن هذه السلسلة بالضبط من العناصر. ويمكن إنتاج العناصر الأكثر ندرةً من خلال تفاعلات نووية تتم من حين لآخر تشتمل على جسيمات شاردة مثل تفاعل الإلكترونات والنيوترونات والبروتونات مع النَّوَى الأكثر شيوعًا. ويمكن لتكوين العناصر الأثقل أن يحدث؛ لأن توازن الطاقة ينطوي على تفضيل النَّوَى الأثقل (الأكثر كتلة) على النَّوَى الأخف، كما هو الحال مع تحويل الهيدروجين إلى هيليوم، وصولًا إلى عنصر الحديد. فعلى سبيل المثال، نواة نظير الكربون-١٢ أقل كتلةً بقليل من ثلاثة جسيمات ألفا، وإذا اجتمعت ثلاثة جسيمات ألفا (بأي وسيلة كانت) في نواة ذرة كربون-١٢ واحدة، تتحرَّر الكتلة «المفقودة» على هيئة طاقة. بالمثل، ومن حيث إجمالي الطاقة، تُعَد نواة الأكسجين ذات ترتيب فعَّال أكثر من نواة كربون ذات جسيم ألفا مستقل، وهكذا وصولًا إلى عنصر الحديد. حتى العناصر الأثقل تُعَد لغزًا قائمًا بذاته؛ لأن نوَيها عبارة عن مجموعات أقل كفاءةً من الكتلة والطاقة؛ لذا تتطلَّب مدخلًا من الطاقة ليدفع النَّوَى لتنضغط بعضها دخل البعض وتنتج عناصر مثل الذهب. ولكن الأولويات تأتي أولًا. ففي أربعينيات القرن الماضي، عندما تناول عالِم الفيزياء الفلكية الرائد فريد

هويل المعضلة التي صارت تُعرف باسم تفاعلات الانصهار النجمي، بدأ بلغز اندماج كل شيء لتكوين عنصر الحديد داخل النجوم.

ينتج عن الاندماج النووي انطلاق الطاقة حين ترتبط النَّوَى الأخف معًا لتكوين نوًى أثقل، وصولًا إلى نواة عنصر الحديد. ولكن جميع النَّوَى بها شحنة كهربائية موجبة، ويحدث بينها تنافر بسبب القوى الكهربائية. ولا يمكن أن تندمج إلا إذا انضغطت معًا بإحكام شديد لدرجة أن القوى النووية تفوق القوة الكهربائية التي تُحاول التفريق بين النَّوَى. وهذا يعني أنها لا بد أن تتحرَّك بسرعة بالغة عندما تصطدم بعضها ببعض، وسرعتها ترتبط بدرجة الحرارة. وبحلول منتصف أربعينيات القرن العشرين كوَّن الفيزيائيون فكرةً جيدةً عن درجات الحرارة اللازمة لمختلِف تفاعلات الاندماج النووي، ولكن كانت ثمة معضلة كبيرة فيما يتعلَّق بالخطوات الأولى في عملية تكوين النَّوَى من خلال إضافة جسيمات ألفا.

لعلك لاحظت أنني لم أذكر أي نواة تتكوَّن من جسيمَي ألفا. فالعنصر المكافئ لهذا يُطلَق عليه نظير بريليوم-٨، ولكن هذا العنصر لا يوجد أبدًا في الطبيعة. ونوى نظير بريليوم-٨ غير مستقرة، وإذا تم تخليقها صناعيًّا فإنها تتفكَّك في الحال. ولذا اقترح عدد من علماء الفيزياء الفلكية أن السبيل إلى التغلُّب على الفجوة بين نظير الهيليوم-٤ ونظير الكربون-١٢ هو اتحاد ثلاثة جسيمات ألفا معًا في آنٍ واحد داخل النجم، لتندمج وتُكوِّن نواةً أُحاديةً لنظير الكربون-١٢ بدون تكوُّن نظير بريليوم-٨ على طول الطريق. ولكن مثل هذا التصادم الثلاثي من شأنه أن يتضمَّن الكثير من الطاقة الحركية التي ستكون أشبه بتحطُّم قطار من كونها اندماجًا سلسًا لجسيمات ألفا. إذن كيف يمكن أن تسير مثل هذه العملية بسلاسة؟

بدأت نظرية هويل بإدراكه عدم وجود حاجة تدعو إلى تصادم ثلاثة جسيمات ألفا في آنٍ واحد فعليًّا. وعلى الرغم من أن عمر نظير بريليوم-٨ قصير — إذ تستمر كل نواة لمدة $١٠^{-١٩}$ ثوانٍ فقط — ففي ظل الظروف الموجودة في قلب النجوم يوجد عدد كبير جدًّا من جسيمات ألفا التي تُنتجها التصادمات باستمرار. وبعضها يوجد دومًا في مكان ما، مثلما توجد المياه دومًا في الحوض إثر فتح الصنبور وتسرُّب المياه عبر فتحة الحوض. وفي نجم تبلغ درجة حرارته المركزية نحو ١٠٠ مليون درجة مئوية، ستتحوَّل نواة واحدة تقريبًا من بين كل ١٠ مليارات نواة إلى نظير بريليوم-٨. لذا يوجد دومًا عدد كبير من نوى عنصر البريليوم التي تمثِّل «أهدافًا» لجسيمات ألفا؛ أي فرصًا لتكوين نوى نظير الكربون-١٢.



فريد هويل. «من مجموعة صور بارينجتون براون، حقوق الملكية الفكرية لكلية جنفيل آند كايوس/ساينس فوتو لايبراري.»

ولكن حتى هذا الاحتمال لم يبدُ واعدًا؛ لأنه لم يستطِع تكوين القدر الكافي من الكربون لتفسير الكمية التي نراها في الكون ما لم يكُن هناك عامل آخر يلعب دورًا.

في عام ١٩٥٣ أدرك هويل ماهية هذا العامل. إن جميع النَّوَى يمكنها أن توجد في حالات مختلفة من الطاقة يُطلق عليها طاقات الرنين. والتشبيه المعتاد لهذا الأمر هو النقر على وتر من أوتار الجيتار. فلكل وتر نغمة أساسية، ولكن يمكن عزف نغمات توافقية مختلفة لتلك النغمة. كذلك النواة لها مستوى طاقة أساسي (الحالة الأرضية)، ولكن إذا تمَّ تزويدها بطاقة إضافية، يكون بإمكانها القفز إلى حالة «استثارة»، مثل كرة تصعد خطوةً لأعلى على درجات سلم. ومثل الكرة وهي تتدحرج لأسفل على السلم، سرعان ما تفقد النَّوَى المستثارة تلك الطاقة الإضافية (ربما على هيئة أشعة جاما) وتستقر مرةً أخرى عند الحالة الأرضية.

قدَّر هويل أنه في ظل الظروف الموجودة داخل النجم، ومع تساوي عوامل أخرى، فإن من شأن تصادم جسيم ألفا بنواة بريليوم قصيرة العمر أن يُسفر عن تفكُّك النواة بكل بساطة. ولكنه استنتج أنه إذا كانت طاقة الجسيمات الواردة مناسبةً تمامًا، فإن من

شأنها أن تدفع النَّوَى المدمجة برفق إلى حالة الاستثارة الخاصة بنظير الكربون-١٢، مثل كرة وُضعت برفق على درجة عالية من درج، ومن عندها يمكن أن تُطلق طاقة وتهبط إلى الحالة الأرضية لنظير الكربون-١٢. تمثَّلت العقبة في أن هذه الحيلة لا تنجح إلا إذا وجدت حالة الاستثارة لنوى نظير الكربون-١٢ عند مستوًى دقيق جدًّا من الطاقة، تحديدًا أعلى من المستوى الأولي بمقدار ٧٫٦٥ مليون إلكترون فولت، بوحدات القياس التي يستخدمها علماء الفيزياء. فإذا كان مستوى الطاقة أعلى من ذلك ولو بنسبة ٥ بالمائة، فلن تؤتي الحيلة ثمارها. ولم يكن أحد يعرف إذا كانت هذه حالة الاستثارة لنظير الكربون-١٢ موجودةً من الأساس أم لا.

لم يأخذ أحد فكرة هويل على محمل الجد. غير أنه رأى حجته دامغةً لا لبس فيها. فعنصر الكربون موجود في الكون. ولا شك أن جزءًا من تكويننا يدخل فيه عنصر الكربون. لا بد أن يكون موجودًا في مكان ما، وأين يمكن أن يكون إلا داخل النجوم؟ في ذلك الوقت كان هويل — الذي كان مقر عمله بجامعة كمبريدج بإنجلترا — يزور معهد كاليفورنيا للتقنية، واستغل الفرصة ليطلب من عالِم الفيزياء التجريبية ويليام فاولر أن يجري تجربةً ليختبر فكرته؛ بحثًا عن الرنين المتوقَّع لنظير الكربون-١٢. والواقع أنه قد فعل أكثر ممَّا هو مطلوب. لقد أرغم فاولر على النزول على رغبته. أخبرني فاولر أنه كان يظن هويل مختلًّا، ولكنه في النهاية وافق على تكليف فريق صغير بإجراء التجربة لإسكاته. وبغض النظر عن الدافع في حد ذاته، أُجريت التجربة. وقد استغرقت ثلاثة أشهر، وأثبتت أن هويل كان محقًّا. فهناك بالفعل رنين كربون في الموضع المناسب تمامًا لتفسير كيفية حدوث تفاعل «ألفا الثلاثي». وتفاجأ الجميع من النتيجة باستثناء هويل.

كان هذا أحد انتصارات العلم، بل لعله المثال الأبرز على طرح النظرية لفرضية ما، ثم إثبات صحتها من خلال تجربة معملية. كان عملًا يستحق جائزة نوبل بجدارة، إلا أن هويل لم يحصل عليها قط، في حين حصل عليها فاولر عن البحث الذي طوَّره كلاهما بالتعاون مع زميلَين آخرَين من هذه الانطلاقة.

في أثناء زيارته التالية لمعهد كاليفورنيا للتقنية، تعرَّف هويل إلى فريق يتكوَّن من الزوجَين البريطانيَّين جيفري ومارجريت بوربيدج، اللذَين كانا يقيمان بصفة مؤقتة في كاليفورنيا (ثم في النهاية انتقلا للعيش هناك بصفة دائمة)، وكانا يحاولان فهم أهمية الوفرة الدقيقة للعناصر المتنوِّعة في النجوم، كما اتضح من خلال التحليل الطيفي. اقتنع فاولر بالمشاركة في هذا العمل كذلك، وتعاون مع الفريق لمعرفة كيف يمكن لمصدر ثابت

للنيوترونات داخل النجوم أن يُحوِّل النوى الناتجة من تفاعلات ألفا إلى عناصر أخرى بالنسب المرصودة فعليًّا. في البداية تابع هويل العمل عن بعد، ولكن في عام ١٩٥٦ اجتمع الأربعة في كاليفورنيا، حيث أوضحوا كل شيء في ورقة بحثية علمية ضخمة نُشرت في عدد أكتوبر من دورية «ريفيوز أوف مودرن فيزيكس» عام ١٩٥٧. وتظهر أسماء مؤلِّفي هذه التحفة البحثية حسب الترتيب الأبجدي: بوربيدج وبوربيدج وفاولر وهويل، وحتى يومنا هذا يُشار إلى الفريق الرباعي الذي قام بهذا العمل بالحروف الأولى من أسمائهم بنفس طريقة كتابة الصيغ الكيميائية: B^2FH.[١] ولكن كان الجميع يعرف أن هويل هو مصدر الإلهام الذي وجَّه هذا العمل، الجميع باستثناء مُؤسَّسة نوبل، التي في النهاية منحت فاولر وحده الجائزة في عام ١٩٨٣؛ تقديرًا لهذا الاكتشاف المذهل. شعر فاولر بالإحراج، ولكنه قَبِل الجائزة. وعندما تُوفِّي فاولر أشار جيفري بوربيدج إلى هذا القرار في نعيه لصديقه العزيز قائلًا إن هذه الجائزة «أحدثت بعض التوتُّر وسط الفريق الرباعي، إذ كنا جميعًا ندرك أن هذا العمل هو نتاج جهد جماعي، وأن العمل الأصلي يعود إلى فريد هويل.» غير أن هذا البحث يُعَد أحد أعمدة العلم، بغض النظر عمن ذهب إليه التقدير. ولولا هذه المصادفة بين رنين الكربون وكمية الطاقة التي يحملها جسيم ألفا الذي يتحرَّك سريعًا داخل النجم، لَمَا كان للكربون وجود، ولا للعناصر الأثقل، ولا للجزيئات المعقَّدة في السحب الغازية التي تتكوَّن منها النجوم، ولا لكواكب مثل الأرض، ولا أي شكل من أشكال الحياة مثلنا في هذا الكون.

فسَّر هذا العمل بالأساس كيف نشأت جميع العناصر داخل النجوم، وصولًا إلى نظير الحديد-٥٦ ونظير النيكل-٥٦ (يحتوي الحديد-٥٦ على ٢٦ بروتونًا و٣٠ نيوترونًا في كل نواة؛ أمَّا النيكل-٥٦ فيحتوي على ٢٨ بروتونًا و٢٨ نيوترونًا في كل نواة؛ أي أربعة عشر جسيم ألفا مندمجًا معًا). وحتى إنتاج العناصر الأثقل ينطوي على بعض من أعنف الحوادث الفلكية التي يشهدها الكون اليوم، حين تنفجر نجوم بأكملها فيما يُعرف بالمستعرات العظمى. وقد شارك فاولر وهويل (وذكرتهما هنا بالترتيب الأبجدي) أيضًا في تطوير هذا الفهم للتخليق النووي النجمي. ولكن تطوُّر هذا الفهم منذ ذلك الحين إلى دراسات موسعة لأحداث فلكية أعنف بكثير.

تشمل ظاهرة المستعر الأعظم نجومًا أضخم بكثير من شمس مجرتنا. بالنسبة إلى النجوم ذات الكتل الأكبر من كتلة شمس مجرتنا بمقدارٍ يتراوح من ضِعف إلى أربعة أضعاف، ينكمش النجم قليلًا، وتزداد سخونته في المنتصف، و«يحترق» الهيليوم ليتحوَّل

إلى مزيج من الكربون والأكسجين، وذلك بعد تحوُّل الهيدروجين إلى هيليوم في لُبه. ولكنه يتوقَّف عند هذا الحد. ففي المراحل اللاحقة من عمره، يُطلق النجم الكثيرَ من المواد، من بينها الكربون والأكسجين، في الفضاء، ثم يهدأ ويستقر في صورة قزم أبيض؛ أي جمرة باردة ذات كتلة قريبة من كتلة الشمس اليوم، ولكن ليست أكبر من كتلة الأرض. أمَّا النجوم الأضخم كتلةً من ذلك، فتكون حيواتها أكثر إثارةً وروعة. وللكتلة الإضافية أهمية؛ نظرًا إلى ضرورة توافر المزيد من الضغط الداخلي حتى تصير الأجزاء الداخلية من النجم ساخنةً بالدرجة الكافية لحدوث المراحل التالية من الاحتراق النووي. ويتحوَّل الكربون إلى نيون وصوديوم وماغنيسيوم؛ وذلك من خلال العمليات التي درسها الفريق الرباعي عند درجة حرارة تصل إلى نحو ٤٠٠ مليون درجة مئوية؛ بينما ينتج عن احتراق الأكسجين عند درجة حرارة تصل إلى نحو ألف مليون درجة مئوية، سيليكون وكبريت وغير ذلك من العناصر الأخرى. ويتحوَّل نظير السيليكون-٢٨ (وهو فعليًّا عبارة عن سبعة جسيمات ألفا ملتصقة معًا) الناتج بهذه الطريقة في النهاية إلى حديد ونيكل. ولكن عند كل مرحلة من مراحل هذه العملية تتخلَّف رواسب، ومن ثم يحتوي النجم الضخم في نهاية حياته على لب من الهيدروجين، يُحيط به غلاف من الهيليوم، تحيط به أغلفة متتالية ومتداخلة من العناصر الأخرى كطبقات قشرة البصل.

عندما تفنى جميع مصادر الطاقة النووية، ينهار النجم. ولكن ينتج عن هذا طاقة وضع الجاذبية، ممَّا يُولِّد قدرًا كبيرًا جدًّا من الحرارة، لدرجة أن النجم ينفجر كمستعر أعظم. يتجه جزء من هذا الانفجار نحو الداخل، ضاغطًا لب النجم ومُحوِّلًا إياه إلى نجم نيوتروني (بكتلة كبيرة تماثل كتلة شمس مجرتنا مضغوطة في كرة قطرها حوالي ٢٠ كيلومترًا)، أو حتى إلى ثقب أسود. ولكن جزءًا كبيرًا من الانفجار يتجه نحو الخارج. ويوفِّر الطاقة التي تنتج العناصر الأثقل من الحديد في الجزء الخارجي من النجم، كما يعمل على توزيع هذه العناصر، أمَّا العناصر الأخرى فتتكوَّن أثناء دورة حياة النجم بالخارج عبر الفضاء؛ لتُشكِّل المادة الخام للنجوم والكواكب الجديدة، وتُشكِّل البشر على واحد من تلك الكواكب على الأقل.

اتضح كل هذا بحلول أواخر ستينيات القرن العشرين، على الرغم من أن الكثير من التفاصيل تمَّ استكمالها على مدى العقود التالية. ولكن كانت ثمة معضلة مزعجة. فعلى الرغم من أن آثار العناصر الثقيلة جدًّا مثل الذهب المرصودة في هذا الكون هي آثار محدودة، فإن الحسابات الدائمة التطوُّر ونماذج المحاكاة الحاسوبية أشارت إلى أن

انفجار المستعر الأعظم لا يمكنه أن يُنتج نسبةً كافيةً منها لتفسير هذه الشواهد. فمن خلال مقارنة نسبة انفجارات المستعرات العظمى المرصودة بالنسب المرصودة لعناصر مثل الذهب والبلاتين واليورانيوم الموجودة في الكون، وجد العلماء أنه بهذه الطريقة لا يمكن تفسير وجود إلا نصف هذا العدد من العناصر الثقيلة جدًّا فقط. كان ثمة شيء آخر ضروري لتكوين الباقي، وبدون معرفة ماهية هذا الشيء بالضبط، أطلق عليه علماء الفلك اسم مستعر ماكرو. استكمالًا لقصة أصل العناصر، وتأكيدًا على دقة تلك الحسابات التي يعود تاريخها إلى نظرية هويل، رُصدت انفجارات مستعرات الماكرو أخيرًا في عام ٢٠١٧، ولكن ليس من خلال ضوئها (في البداية).

في ١٤ سبتمبر عام ٢٠١٥ فتح علماء الفضاء نافذةً جديدةً على الكون. فلأول مرة رصدوا موجات الجاذبية — وهي عبارة عن تموُّجات في الفضاء — من خلال حدث فلكي عنيف وقع في مكان ما بعيد عبر الفضاء. كان ذلك الحدث الفلكي هو اندماج بين ثقبَين أسودَين. كان اكتشاف موجات الجاذبية متوقَّعًا قبل فترة طويلة؛ إذ كانت فرضية تكهَّنت بها نظرية النسبية العامة لأينشتاين، ولطالما سُعي إليها. ولكنها عندما تصل إلى الأرض تكون دقيقةً على نحو لا يُصدَّق، ويصعب رصدها للغاية. كانت «التلسكوبات» المستخدمة في الرصد مصممةً لتكون عبارةً عن أنابيب مفرغة بطول ٤ كيلومترات، مزودة بمرايا تعكس ضوء الليزر ذهابًا وإيابًا على طول الأنابيب، وتتم موازنتها بدقة بالغة، وتخضع لمراقبة دقيقة جدًّا، حتى إنها كانت عندما تتحرَّك عبر مسافة أقل من قطر الذرة، كان يمكن قياس الذبذبة.[٢] تتنبَّأ نظرية أينشتاين بدقة بنوعية الذبذبة التي تُنتجها الموجات من أشياء مثل اندماج الثقوب السوداء، وكان هذا النوع من الذبذبة هو بالضبط ما تمَّ رصده في سبتمبر عام ٢٠١٥. ومنذ ذلك الحين رصدت أجهزة رصد موجات الجاذبية حول العالم (إذ يوجد اثنان في الولايات المتحدة وواحد في كلٍّ من أوروبا والهند) عدة «أحداث فلكية» أخرى، كما يحب أن يُطلِق عليها علماء الفلك، خاصةً بموجات الجاذبية، وثمة حدث فلكي على وجه الخصوص وثيق الصلة بقصتي.

في السابع عشر من أغسطس عام ٢٠١٧ رصدت أجهزة كشف موجات الجاذبية نمطًا مختلفًا قليلًا من التموُّجات، استمرَّت لمدة ١٠٠ ثانية فقط، وجاءت متوافقةً مع التكهُّنات الخاصة بالنمط الذي قد ينشأ عند تصادم نجمَين نيوترونيَّين. كان هذا أمرًا مثيرًا بصفة خاصة؛ لأنه على عكس اندماج ثقبَين أسودَين كان من المتوقَّع أن ينتج عن تصادم نجم نيوتروني انفجار للضوء وغيره من الإشعاعات، مثل أشعة جاما. وقد كانت اندماجات

النجوم النيوترونية، في الواقع، تعتبر صورةً محتملةً من الانفجارات الافتراضية لمستعرات الماكرو التي قد ينتج عنها عناصر ثقيلة، وقدَّر علماء الفلك إلى أي مدًى قد تكون هذه الحوادث الفلكية شائعة، بناءً على عدد النجوم الموجودة في مجرات أشبه بمجرتنا.[٣] أشارت المشاهدات تقريبيًّا إلى الاتجاه الذي جاءت منه موجات الجاذبية، وفي غضون ساعات من الرصد، وجَّه علماء الفلك تلسكوباتهم في ذلك الاتجاه. وعثروا على جرم ساطع قصير العمر في مجرة قريبة تُدعى مجرة «إن جي سي ٤٩٩٣»، تبعد عنَّا ١٣٠ مليون سنة ضوئية تقريبًا. كان هذا الجرم مستعرًا ماكرويًا. وأظهر التحليل الطيفي أن هذا المستعر الماكروي أنتج بالفعل الكثير من العناصر الثقيلة؛ مثل اليورانيوم والذهب والبلاتين. فاشتمل هذا المستعر على ٢٠٠ ضعف كتلة الأرض على هيئة ذهب، و٥٠٠ ضعف كتلة الأرض على هيئة بلاتين. وعندما ضُربت الكمية المرصودة في هذا الانفجار في التردُّد المحسوب لاندماجات النجوم النيوترونية، كانت النتيجة أن مثل هذه الانفجارات يمكن أن ينتج عنها النصف «المفقود» من العناصر الثقيلة. وهذا يعني، من جملة أمور أخرى، أنك إذا كان لديك خاتم زواج أو أي حُلِي أخرى مصنوعة من الذهب أو البلاتين، فيمكنك أن تتيقن أن الكثير من ذرات هذه الحلية قد تكوَّنت أثناء تصادم نجمَين نيوترونيَّين، وانتشرت في الفضاء أثناء انفجار ضخم، غُرست في السحابة التي تكوَّنت منها الشمس والأرض.

إذن عرفنا كيف تكوَّنت العناصر داخل النجوم، وعرفنا أن تلك العناصر تجمَّعت في جزيئات عضوية بالفضاء، وعرفنا أن هذه الجزيئات المعقَّدة نزلت إلى سطح الأرض برفق بمجرَّد تكوُّنها، حيث صارت المكوِّنات الرئيسة للحياة. ولكن كيف تتعاون تلك المكوِّنات لتكوِّن كائنات حيةً مثلنا؟ والإجابة عن هذا السؤال تقودنا إلى عمود مذهل آخر من أعمدة العلم.

هوامش

(١) تُنطق «B تربيع FH».

(٢) للاطلاع على المزيد من التفاصيل قم بزيارة الموقع الإلكتروني التالي: https://www.amazon.co.uk/Discovering-Gravitational-Waves-Kindle-Single-ebook/dp/B071FFJT74.

(٣) نظرًا إلى أن النجوم النيترونية شديدة الكثافة، تكون هذه التصادمات فعَّالة للغاية في تكوين عناصر ثقيلة، غير أنها لا ينتج عنها إلا حوالي عُشر الضوء الذي تُنتجه المستعرات العظمى؛ ولذا يكون العثور عليها أكثر صعوبة.

العمود السادس: كتاب الحياة مكتوب بكلماتٍ ثلاثية الأحرف

الطبيعة المعقَّدة للحياة مستمدَّة من مجموعتين من الجزيئات: البروتينات والأحماض النووية. وهذه الجزيئات في حدِّ ذاتها مستمدَّة من مجموعةٍ متنوعة متواضعة نسبيًّا من المركبات. وهناك ٩٢ عنصرًا توجد بصورةٍ طبيعية على سطح الأرض، ولكن ٢٧ عنصرًا منها فقط هو ما يشكِّل ضرورةً للكائنات الحية، وهذه العناصر الـ ٢٧ ليست موجودة كلها في جميع الكائنات الحية.

تلعب البروتينات دورين. نوع منها يعطي للجسم بنيته وشكله، ويتكوَّن بها أشياء مثل الشعر والعضلات والريش والأظافر والصدف. وقد أظهر مزيجٌ من التحليل بالأشعة السينية، والكيمياء، وفهْم عمليات ميكانيكا الكمِّ التي تجعل الذرات تتماسك معًا لتكوِّن الجزيئات، أن هذه البروتينات تتكوَّن من سلاسلَ طويلةٍ من الأحماض الأمينية التي تشكِّل بنية لولبية. ومن الواضح تمامًا أن هذا النوع من الجزيئات يمكنه أن ينتج أشياءَ طويلةً ورقيقة مثل الشعر، ولكن يمكنه أيضًا أن يُنتِج طبقات صلبة لأشياء مثل الأظافر عندما ترتبط اللوالب الفردية معًا جنبًا إلى جنب من خلال روابط كيميائية من نوعٍ أو آخر. كل هذا أثبته لينوس باولنج وزملاؤه بمعهد كاليفورنيا للتقنية، الذين نشروا سلسلة أبحاث غير مسبوقة تتكوَّن من سبعة أبحاث علمية عن بنية البروتينات في دورية «بروسيدينجز أوف ذا ناشونال أكاديمي أوف ساينسز» في عام ١٩٥١. أما النوع الآخر من البروتينات، فيوفِّر المكوِّنات الحيوية للجسم. مكونات مثل الهيموجلوبين الذي يحمل الأكسجين في مجرى دمك، والمواد المعروفة باسم الإنزيمات التي تحثُّ (أو تثبط في بعض الحالات)

تفاعلات كيميائية معينة مهمة للحياة. وقد ثبت أن لغز تركيبها هو أحد أصعب الألغاز التي يمكن حلها.

ويأتي مفتاح حل اللغز وراء صعوبة تفكيك هذا النوع من البروتينات من الاسم الذي سُمِّيت به أخيرًا؛ ألا وهو البروتينات الكروية. فقد اتضح أنها تتكوَّن أيضًا من سلاسلَ طويلة من الأحماض الأمينية، ولكن تبيَّن أيضًا أنه في هذه الحالة تلتف السلاسل على هيئة كرات صغيرة، ولكل نوع من البروتينات الكروية شكل ثلاثي الأبعاد مميز خاص به. وشكل البروتين الكروي، وكذلك تركيبه الكيميائي، هو ما يحدِّد دوره في العمليات الكيميائية للحياة. على سبيل المثال، للهيموجلوبين تجويف يتناسب تمامًا مع حجم جزيء الأكسجين وشكله ليستقر بداخله. أو تخيَّل بروتينًا كرويًّا به تجويفان، كلٌّ منهما يتناسب تمامًا لاحتواء جزيء أصغر مختلف. وعندما تفعل ذلك، تصطف بطريقة يمكن أن تسمح بتكوين روابط بينها، قبل أن تُطلق على هيئة جزيء أحادي أكبر حجمًا. هذا أشبه بالطريقة التي اجتمعت بها الجزيئات الصغيرة معًا على أسطح حبيبات الثلج في أعماق الفضاء قبل تكوُّن الأرض. على سبيل المثال، قد يربط أحد الإنزيمات بين أزواج معينة من الأحماض الأمينية بتلقائية وتكرارية لتكوين حلقة في سلسلة متنامية ستصير جزيء بروتين آخرَ.

بحلول عام ١٩٥٩، توصَّل علماء من مختبر مجلس البحوث الطبية بالمملكة المتحدة إلى تركيب الهيموجلوبين نفسه. واكتشفوا أنه يتألف من أربع سلاسل، كل سلسلة منها تتكوَّن من أحماض أمينية متشابهة، مرتبطة معًا لتصنع كرةً شبه كروية تحتوي على أربعة جيوب على سطحها يمكن أن تستقر فيها جزيئات الأكسجين. ونجد أن السلاسل شبه المتطابقة تؤدي الوظيفة نفسها في دم الكائنات الحية على اختلافها، سواء أكانت خيولًا أم حيتانًا. والتطور عملية تتسم بالتحفُّظ الشديد؛ فبمجرد أن تجد جزيئًا يجيد أداء وظيفة معينة، تتشبَّث بهذا الجزيء دون أن تستبدله. ولكن كيف عرفت طريقة تصنيع هذه الجزيئات؟ هنا يأتي الدور الذي تلعبه الأحماض الأمينية في القصة، على الرغم من أن فهْم دور الحمض النووي والحمض النووي الريبي قد استغرق وقتًا طويلًا.

عندما عُرفت الأحماض النووية لأول مرة باعتبارها مكوِّنات أساسية للخلايا الحية، كان يُعتقد أنها نوع من المواد البنائية، كالسقالات، ترتبط بها جزيئات البروتين الأكثر تعقيدًا والأكثر إثارة للاهتمام (كما كان يُعتقد). وكان هذا الاعتقاد خطأً ساذَجًا؛ لأن جزيئات الحمض النووي والحمض النووي الريبي تبدو في ظاهرها بسيطة. فكلٌّ منها عبارة عن جزيء طويل يتكوَّن من أربع وحدات فرعية تُسمَّى القواعد. تتشابه ثلاث من

هذه القواعد في كلٍّ من الحمض النووي والحمض النووي الريبي، بينما تختلف القاعدة الرابعة في الجزيئين، ومن ثَم يكون إجمالي القواعد الداخلة في تركيب الحمضين خمس قواعد. وهذه القواعد النووية هي يوراسيل (U) وثايمين (T) وسايتوسين (C) وأدينين (A) وجوانين (G). تحتوي جزيئات الحمض النووي على الجوانين والأدينين والثايمين؛ بينما تحتوي جزيئات الحمض النووي الريبي على الجوانين والأدينين والسايتوسين واليوارسيل. ينشأ كلٌّ من اليوراسيل والثايمين والسايتوسين حول حلقات سداسية الجوانب من ذرات الكربون والنيتروجين، بينما يرتكز كلٌّ من الأدينين والجوانين على حلقتين من هذه الحلقات متصلتين جنبًا إلى جنب، على شكل رقم ٨. وهذه القواعد متصلة بهيكل مركزي يحتوي على السكريات المناسبة (سكر الريبوز أو سكر الريبوز منقوص الأكسجين) المرتبطة بعضها ببعض في سلسلة، مع بروز القواعد من على جانب هذا الهيكل. ورغم ذلك، لم تكن تفاصيل هذا الأمر معروفةً حتى أوائل خمسينيات القرن العشرين، عندما استخدم فرانسيس كريك وجيمس واطسون من جامعة كمبريدج بيانات الأشعة السينية التي توصَّل إليها كلٌّ من روزاليند فرانكلين ورايموند جوسلينج بكلية كينجز كوليدج بلندن، تلك البيانات التي نقلها أحد الزملاء إلى واطسون دون علمهما أو إذنهما، لتحديد بنية «اللولب المزدوج» الشهير للحمض النووي. كانت الفكرة الأصلية هي أن القواعد مرتَّبة بطريقةٍ منظمة على طول أجزاء الأحماض النووية، وتسير بنمط على غرار GACTGACTGACTGACT ... في الحمض النووي و... GACUGACUGACUGACU في الحمض النووي الريبي. غير أن هذه «الرسالة» لا تحمل الكثير من المعلومات.

توقَّفت الأمور عند هذا الحد، بشكل أو بآخر، في منتصف أربعينيات القرن العشرين. كان من المعروف آنذاك أن المادة الوراثية التي تمر عبر المخطَّط الأولي — أو الوصفة — للحياة توجد داخل بنًى كبيرة يُطلق عليها الكروموسومات توجد في قلب الخلايا، وأن هذه الكروموسومات تُنسخ وتُمرَّر إلى الأجيال التالية لتحمل هذه الوصفة وتنقلها بدورها. ولكن كان من المعروف أيضًا أن الكروموسومات تحتوي على كلٍّ من الحمض النووي والبروتينات، وكان يُعتقد أن البروتينات هي العنصر المهم لنقل المعلومات. فعلى سبيل المثال، قد تكون إحدى الطرق التي ربما «عرفت» بها الخلية كيف تُكوِّن البروتينات التي تحتاج إليها لأداء وظيفتها هي أن ترتبط عينة من كل بروتين بسقالات الحمض النووي، لتكونَ بذلك جاهزةً للنسخ عند اللزوم. كان هذا منطقيًّا، ولكنه كان افتراضًا خاطئًا.[١] ومع ذلك، كان واضحًا أن الكروموسومات تحمل وصفة الحياة، على هيئة «شفرةٍ» ما.



ريموند جوسلينج. «أرشيف كلية كينجز كوليدج بلندن/ساينس فوتو لايبراري».

كان الشخص الذي وضع العلماء على الطريق لمعرفة شفرة الحياة تلك هو الفيزيائي إرفين شرودنجر، الذي يشتهر في عصرنا الحالي بأنه مبتكِر «مفارقة القطة» الشهيرة لميكانيكا الكَمِّ.[٢] ففي عام ١٩٤٣، كان شرودنجر يعمل في معهد دبلن للدراسات المتقدمة، حيث انتقل إلى هناك باعتباره لاجئًا هربًا من النازيين بعد استيلائهم على بلاده النمسا. في ذلك العام، ألقى سلسلة من المحاضرات بكلية ترنيتي كوليدج في دبلن تحت عنوان «ما الحياة؟» وقد نُشرت في العام التالي بكتابٍ يحمل العنوان نفسه. وقد كان لهذا الكتاب أثرٌ هائل على جيل العلماء الذين سعَوا إلى فكٍّ شفرة الحياة بعد انتهاء الحرب العالمية الثانية، وكان من بين هؤلاء العلماء كريك وواطسون.

كانت الفكرة الأساسية، التي قدَّمها شرودنجر ومُرِّرت إلى أولئك الباحثين، أن «الجزء الأهم في الخلية الحية — خيط الكروموسوم — ربما كان من الأحرى أن يُسمَّى بالبلورة اللادورية.»[٣] كان يرى أن المكون الأساسي للكروموسوم هو البروتين، ولكن هذا لا يَهُمُّ في حد ذاته؛ لأن فكرته تنطبق بالقدرِ ذاته من الكفاءة على الخيوط المؤلفة من الحمض النووي. والبلورة اللادورية، حسب مصطلحاته، هي شيء أشبه بتركيبة ملح الطعام، أو كلوريد الصوديوم، الذي تكوِّن فيه مجموعة تبادلية من ذرات الصوديوم (Na) والكلورين (Cl)

مصفوفة متكررة ثلاثية الأبعاد، NaClNaClNaClNaCl ... لها بنية ولكنها تنقل كمًّا قليلًا جدًّا من المعلومات. تتشابه هذه الفكرة إلى حدٍّ كبير مع فكرة اعتبار الحمض النووي سقالة تُعلَّق عليها البروتينات. يمكن فهْم ما كان شرودنجر يعنيه بالبلورة اللادورية من خلال تصوُّر لوحة نسيجية مزخرفة. فإذا كان لديك جدائل من الخيوط ببضعة ألوان، يمكن ترتيبها جنبًا إلى جنب ونسْجها لتصنع شرائطَ من لون واحد — مثل الأحمر والأصفر والأزرق والأخضر — في بساطٍ مخطَّط. هذا التشبيه هو التشبيه المكافئ للبلورة الدورية. أو يمكن نسج هذه الخيوط نفسها بطريقةٍ أكثرَ تعقيدًا لصنْع صورةٍ لزهرة. وهذا التشبيه هو التشبيه المكافئ للبلورة اللادورية. وقد أشار شرودنجر إلى أنه على الرغم من أنها مصنوعة بهذه الطريقة من جدائل ذات ألوان قليلة مختلفة، فثمَّة بنية في «لوحات رافائيل النسيجية التي لا تُظهِر أيَّ تكرار ممل وإنما تصميم متقن ومترابط ومعبِّر.»

أشار شرودنجر أيضًا إلى أن ما أطلق عليه «النص المشفر» الذي تحمله البلورة اللادورية في خيوط الكروموسوم قد يحتوي على جميع المعلومات اللازمة لإنتاج البروتينات، دون الحاجة إلى حمل نسخة من كل نوع من أنواع البروتينات كقالب نموذجي داخل الكروموسومات نفسها. فالأمر لا يتطلب سوى ٢٠ حمضًا أمينيًّا مختلفًا فقط لتكوين جميع البروتينات المختلفة المهمة للحياة، وإذا تخيلت هذه الأحماض الأمينية كأنها «كلمات» تصطف على طول جزيء البروتين لتكون جملة (أو كتاب!) فسيكون لديك متسع كبير لنقلِ قدرٍ من المعلومات يماثل ما تنقله جميع حروف الأبجدية التي استخدمتها لتأليف هذا الكتاب، الذي يحتوي على قدرٍ كبير من المعلومات (أتمنى أنك توافقني الرأي في هذا) يفوق مجرد التكرار الممل للحروف الأبجدية المصطفة من الألف إلى الياء. ولكن هل ستحتاج إلى أبجدية تتألف من ٢٠ حرفًا حتى لتأليف كتاب الحياة؟

أدرك شرودنجر أنه لا حاجة إلى أشياءَ معقَّدة مثل الأحماض الأمينية. فحتى الذرات المفردة يمكن أن تؤدي المهمة إذا ما أمكن ترتيبها على نحوٍ مناسب: «ليس بالضرورة أن يكون عدد الذرات [المختلفة] في مثل هذه البنية [البلورة اللادورية] ضخمًا لينتج عددًا غير محدود تقريبًا من التنظيمات الممكنة.» وضرب مثالًا على ذلك بشفرة مورس، حيث توجد علامتان أساسيتان فقط، هما النقطة والشَّرطَة، ولكن يمكن وضعهما معًا في مجموعاتٍ حتى أربعة رموز لتصنع ٣٠ توصيفًا مختلفًا، كافيًا للحروف الأبجدية الإنجليزية بالإضافة إلى بضع من علامات الترقيم. وبإضافة علامة ثالثة، واستخدام العلامات الثلاث في مجموعاتٍ لا تزيد عن عشرة رموز، «يمكنك أن تصنع ٨٨٥٧٢ «حرفًا» مختلفًا، وبخمسة رموز ومجموعات تصل إلى ٢٥ رمزًا، يكون العدد ٣٧٢٥٢٩٠٢٩٨٤٦١٩١٤٠٥.» يبدو

أن شرودنجر هنا كان مأخوذًا بعض الشيء بتدريبه كفيزيائي؛ نظرًا إلى عدم وجود حاجة لمثل هذا العدد الهائل جدًّا من الكلمات. ولكن هذا لم يتضح إلا بعد تحديد بنية الحمض النووي.

إن تلك القصة مشهورة جدًّا لدرجةٍ لا تستدعي الخوض في تفاصيلها هنا، ولكن ما يَهُمُّ أن كل جزيء من الحمض النووي يتكون من شريطين، يلتف أحدهما حول الآخر لتشكيل اللولب المزدوج الشهير. ولكل شريط مفرد من الحمض النووي هيكل مركزي يتألف من سلسلة من مجموعة سكريات مرتبطة بعضها ببعض من خلال مجموعات فوسفات (تتكون مجموعة الفوسفات من ذرة فوسفات واحدة تحيط بها أربع ذرات أكسجين). وكما رأينا في موضعٍ سابق، تلتصق القواعد (الجوانين والأدينين والثايمين والسايتوسين) بمجموعات السكريات، وتبرز من على جانبي هذا المحور. والأزواج المختلفة من هذه القواعد تحمل بعض التشابه إحداها للأخرى، والفضل في ذلك يعود إلى شكلها وإلى شكل ضعيف من الجذب الكهربائي يُسمَّى الرابطة الهيدروجينية. ويرتبط الثايمين والأدينين على نحوٍ طبيعي بعضهما ببعض بهذه الطريقة، وكذلك السايتوسين والجوانين. ويعمل هذا على ربط شريطي الحمض النووي معًا، ولكن على نحوٍ مفكَّك نسبيًّا. وفي كل موضع على أحد الشريطين يوجد به ثايمين، يوجد على الشريط المقابل أدينين؛ وفي كل موضع يوجد به سايتوسين، يوجد على الشريط المقابل جوانين. والعكس صحيح. وكان هذا الاقتران هو أساس نموذج كريك–واطسون للحمض النووي، وفي نهاية بحثهما الشهير، المنشور في دورية «نيتشر» في عام ١٩٥٣، كتبا على استحياء يقولان:

> لم نغفل عن ملاحظة أن الاقتران الذي افترضناه يوحي على الفور بإمكانية وجود آلية نسخ للمادة الوراثية.

وكانت هذه هي حيلتهما لتحديد أولويتهما[٤] لفكرةِ أنه يمكن نسخ الحمض النووي إذا تفكَّك الشريطان وكوَّن كل شريط لنفسه شريطًا جديدًا من خلال الارتباط بمكوناتٍ أخرى من الحساء الكيميائي الموجود داخل الخلية. فكل قاعدة أدينين على شريط مفرد تجتذب قاعدة ثايمين من الحساء، وكل قاعدة ثايمين تجتذب أدينين، وكل قاعدة جوانين تجتذب قاعدة سايتوسين، وكل قاعدة سايتوسين تجتذب قاعدة جوانين. والنتيجة هي لولبان مزدوجان متطابقان في موضعٍ اعتادا فيه أن يكونا لولبًا واحدًا. وهكذا نُسِخت المادة الوراثية. كان فهْم كيفية قيام آليات الخلية بذلك بالضبط مستغلقًا في عام ١٩٥٣، ولكن

كان بيت القصيد أن هذا الأمر يمكن أن يجدي، من حيث المبدأ. كان السؤال المهم الذي أثاره هذا الموقف هو: ما الذي كان يتم نسخه بالضبط؟ كيف اختزن الحمض النووي المعلومات في كتاب الحياة؟

ثمَّة فيزيائي آخر هو جورج جاموف، الأمريكي الجنسية والروسي المولد، هو مَن وضع العلماء الآخرين، وبالأخص فرانسيس كريك، على الطريق. وذكر جاموف فيما بعدُ أنه في عام ١٩٥٣، أثناء زيارته للحرم الجامعي لجامعة كاليفورنيا في بيركلي:

> كنت أسير عبر الرواق في مختبر الإشعاع، حيث وقف لويس ألفاريز وبيده نسخة من دورية «نيتشر» … حينئذٍ قال: «انظر، يا لها من مقالة رائعة كتبها واطسون وكريك.» كانت هذه أول مرة أراها فيها. ثم عُدت إلى واشنطن وبدأت التفكير في الأمر.[٥]

توصَّل جاموف إلى فكرة أن جزيئات البروتين يمكن أن تكون قد تكوَّنت مباشرة على طول شريطي الحمض النووي، إذا كان صف القواعد النووية على طول الحمض النووي يحمل شفرة كل حمض أميني ضروري لتكوين البروتين بالترتيب الصحيح على طول جزيء الحمض النووي. وكان في هذا محاكاة لفكرة شرودنجر، التي لم يكن جاموف على دراية بها. كتب جاموف إلى واطسون وكريك يُطلِعهما على فكرته، وأعلن عنها في ورقة بحثية نُشرت عام ١٩٥٤ في دورية «نيتشر»:

> يمكن تمييز الخصائص الوراثية لأي كائن حي من خلال عدد طويل مكتوب على هيئة نظام رقمي رباعي. ومن ناحية أخرى، [البروتينات] عبارة عن سلاسل ببتيدية طويلة تتألَّف من نحو عشرين نوعًا مختلفًا من الأحماض الأمينية … السؤال يكمن في الطريقة التي يمكن بها ترجمة الأعداد الرباعية الأرقام إلى [أحماض أمينية].

كانت تفاصيل فكرة جاموف خاطئة، ولكن بحديثه عن شفرة الحياة بهذه الطريقة حثَّ كريك وغيره الكثيرين على محاولة فهْم كيف تؤتي مثل هذه «الترجمة» ثمارها. كان من الخطوات الأساسية في سبيل ذلك فهْم دور الحمض النووي الآخر، ألا وهو الحمض النووي الريبي، أو الآر إن إيه.

كان من أحد الألغاز المتعلِّقة بكيفية مشاركة الحمض النووي بفاعلية في آليات عمل الخلية أن الحمض النووي مُختزَن في قلب الخلية، تحديدًا داخل نواة الخلية. وتحدث جميع

العمليات، بما فيها تصنيع البروتينات، في الجزء الخارجي من الخلية، أو السيتوبلازم. توجد هناك كمية ضئيلة جدًّا من الحمض النووي، وكمية وفيرة من الحمض النووي الريبي. وعلى الرغم من أن كمية الحمض النووي في كل خلية من خلايا كائن حي معيَّن واحدة في جميع الخلايا الأخرى طوال الوقت، فإن كمية الحمض النووي الريبي تختلف إلى حد كبير من خلية لأخرى ومن وقتٍ لآخر في أي خلية فردية. وصار واضحًا أن الحمض النووي الريبي يدخل مباشرة في تصنيع البروتينات، وأن أجزاءً من الشفرة الوراثية تُنسخ من الحمض النووي على شريطين جديدين من الحمض النووي الريبي كما هو مطلوب، ثم يُطلق الحمض النووي في السيتوبلازم ويُستخدم لإنتاج جزيئات البروتين تقريبًا بالطريقة نفسها التي اقترحها جاموف، وبعد ذلك يتفكَّك شريطا الحمض النووي الريبي ويُعاد استخدام الأجزاء مرة أخرى. فالحمض النووي أشبه بمكتبة، مخزن معلومات، تُنسخ منه كتب فردية، أو كتيبات تعليمات لتصنيع بروتينات معينة، على الحمض النووي الريبي كما هو مطلوب. عندما ينحل جزء من جزيء الحمض النووي ويُنسخ على الحمض النووي الريبي باستخدام الآلية التي «لم يغفل [كريك وواطسون] عن ملاحظتها»، تُستبدل كل قاعدة يوراسيل بقاعدة ثايمين، ولكن دون حدوث أي اختلافات مؤثرة أخرى. وبهدف التبسيط، عند مناقشة الشفرة الوراثية من الآن فصاعدًا، سأصِفُها على أساس القواعد النووية للحمض النووي الريبي، اليوراسيل (U) والسايتوسين (C) والجوانين (G) والأدينين (A).

انطوى فكُّ الشفرة على مساهمة أشخاص كثيرين في إجراء الكثير من أبحاث الكيمياء الحيوية، لكشف التفاصيل الخاصة بآليات عمل الخلية خطوة بخطوة. ولكن ليس هذا هو المقام للخوض في كل هذه التفاصيل، التي يمكنك أن تجدها في كتاب هوراس جادسون،[٦] وإنما سأركِّز هنا على الفكر الكامن وراء التجارب، والنتائج التي توصَّلت إليها هذه التجارب. في وقت مبكِّر جدًّا، قرَّر الباحثون التركيز على شفرة ثلاثية وليس على الشفرة الرباعية الأرقام التي اقترحها جاموف؛ لأن كلَّ ما تحتاج إليه هو ثلاثة حروف فقط. فإذا كان لديك أربع قواعد وتعاملت مع كلٍّ منها باعتبارها حرفًا، فإن استخدام كل واحدة منها على نحوٍ مستقل لن يمكنك سوى من تشفير أربعة أحماض أمينية فقط. وبصياغة قاعدتين بشفرة ثنائية في كل مرة، يمكن الحصول على ستة عشر ترتيبًا مختلفًا؛ وست عشرة كلمة ليست كافية لتشفير ٢٠ حمضًا أمينيًّا ضروريًّا للحياة. ولكن بالكلمات الثلاثية الأحرف، أو الشفرة الثلاثية، تستطيع أن تحصل على ٦٤ تركيبة مختلفة، وهو عدد أكثرُ من كافٍ لتشفير جميع الأحماض الأمينية الضرورية، مع تبقي عدد كافٍ من الرموز للعمل

كمكافئ لعلامات الترقيم، بما في ذلك علامات بداية «رسالة» معينة ونهايتها. وبالاستعانة بالشفرة الرباعية الحروف، سيصل عدد الكلمات المفردة إلى ٢٥٦ كلمة، وهو عدد أكبر بكثير من العدد المطلوب.

خلال الخمسينيات والستينيات القرن العشرين، أجرى علماء الكيمياء الحيوية تجاربَ تضمَّنت شرائط الحمض النووي الريبي التي تتكوَّن من مجموعة متنوعة من القواعد، بهدف معرفة نوعية البروتينات التي تصنعها. وجاء إنجاز علمي مهم باكتشاف أن شريطًا مكررًا من الحمض النووي الريبي الذي يحمل السلسلة المتكررة من قواعد اليوراسيل UUUUU ... (يوراسيل متعدد)، عند وضعه في بيئة كيميائية مناسبة تحاكي البيئة الموجودة داخل الخلية، من شأنه أن يُنتِج سلسلةً مكررة مؤلفة من وحدات متكررة من الحمض الأميني الفينيل ألانين .phe. phe. phe ... (فينيل ألانين متعدِّد). وهذا الحمض عبارة عن بروتين من الناحية العملية، ولكنه عديم الفائدة بالنسبة إلى الكائنات الحية. غير أن ذلك كان يعني أن الكلمة الأولى ثلاثية الأحرف قد تم تحديدها. فالشفرة UUU في الحمض النووي الريبي تكافئ الحمض الأميني الفينيل ألانين (phe). وقد قاد قدرٌ هائل من العمل على هذا المنوال إلى فهْم كامل للشفرة. فكل شفرة من الشفرات الثلاثية التي يمكن أن تتكوَّن من القواعد الثلاث اليوراسيل والسايتوسين والجوانين والأدينين ترتبط بحمض أميني معيَّن أو بعلامة ترقيم. وبعض الأحماض الأمينية تُشفَّر بعدة كلمات ذات أحرف ثلاثية — على سبيل المثال، الحمض الأميني فالين يمكن الإشارة إليه بـ GUU أو GUC أو GUA أو GUG— إلا أن هذا التكرار لا يؤثِّر على طريقة قراءة كتاب الحياة. ورغم أن هذا قد يبدو مدهشًا، فإن قصة الحياة بأكملها يمكن كتابتها فعلًا بكلمات ثلاثية الأحرف. ولكنك بحاجة إلى الكثير من الكلمات لتحكي تلك القصة.

ما حجم هذا الكتاب؟ في الخلايا البشرية، يلتف الحمض النووي المختزَن في الكروموسومات داخل النواة على هيئة لفائف هي نفسها ملتفة داخل لفائف فائقة. يوجد حوالي ٣ مليارات زوج من القواعد، مرتبطة بعضها ببعض عبر شرائط الحمض النووي، في كل خلية، وتكون مختزنة بطريقة محكمة للغاية لدرجةِ أنها لا تشغل مساحة سوى ستة ميكرونات فقط (أي ستة أجزاء من المليون من المتر) عرضًا. ولو كان بالإمكان تفكيك هذا الحمض النووي بأكمله وفرده، لبلغ طوله نحو مترين. ولو أن كلَّ الحمض النووي الموجود في جميع خلايا الجسم فُرِد بهذه الطريقة ومُدَّ بحيث يتصل في خط مستقيم، لامتد مسافة ١٦ مليار كيلومتر؛ أي أكثر من المسافة بين الأرض والشمس بألف ضعف.

لم يُتوصَّل بعدُ إلى فهْمٍ كامل ودقيق لكيفية تفكك أجزاء الحمض النووي من هذه الحالة المضغوطة ونسخها على الحمض النووي الريبي عند اللزوم. ولكن ثمَّة سمة أساسية للعملية ربما تكون قد أدركتها بالفعل. السبب الوحيد الذي يجعل ذلك ممكنًا أن الشريطين المتطابقين لجزيء الحمض النووي مرتبطان بعضهما ببعض على نحوٍ غير محكم، من خلال الروابط الهيدروجينية التي ذكرتها عرضًا في موضعٍ سابق، بحيث يمكن أن تُفتح وتُغلق مرة أخرى مثل الطرفين المتقابلين لسحَّاب. والترابط الهيدروجيني يُعَد من أسس وجود الحياة كما نعرفها الآن، ويمكن فهْمها بسهولة أكثرَ في سياق مفاجأة علمية أخرى؛ ألا وهي خفة الثلج المذهلة.

هوامش

(١) هذا عكس الحقيقة؛ ففي الكروموسومات، تكون البروتينات هي المادة البنائية، والحمض النووي هو الذي يحمل المعلومات، كما سأوضح لاحقًا.

(٢) طالع كتابي «ستة أشياء مستحيلة».

(٣) التأكيد من وضع شرودنجر.

(٤) لقد نجحت الحيلة، بدليل اقتباسي لها هنا.

(٥) مقابلة شخصية وردت في «مجموعة جورج جاموف» بمكتبة الكونجرس، واشنطن دي سي.

(٦) انظر الجزء الخاص بـ «قراءات إضافية».

العمود السابع:
خفَّة الثلج المذهلة

يطفو الثلج فوق المياه. ذاك أمرٌ واضح وبديهي للغاية لدرجةِ أن غالبيتنا لا يتوقف ليفكِّر فيه مطلقًا. بيد أن هذا يُعَد سمةً أساسية ومميزة لبيئتنا، وهو أمر غريب بكل وضوح، كما يشير أحد التجارب المنزلية البسيطة. فإذا أخذت حاويتين شفَّافتين، وملأت إحداهما جزئيًّا بالماء والأخرى بزيت الزيتون، ثم وضعتهما في المجمِّد، سيتجمد كلا السائلين. سيتكوَّن الثلج من الماء، في حين سيتحول زيت الزيتون إلى مادة صلبة أشبه بالزبد. الآن، أخرِج الحاويتين من المجمِّد وضَعْهما على طاولة دافئة عند الذوبان. سيتكوَّن في إحداهما الماء السائل في القاع عندما يذوب الثلج، حتى لا يتبقَّى سوى طبقة من الثلج تطفو على سطح الماء. أما في الحاوية الأخرى، فتبقى الكتلة الموجودة في القاع صلبة، بينما يرتفع الزيت الذائب إلى السطح، مكوِّنًا طبقة سائلة فوق الكتلة الصلبة. الموقف الثاني أكثر تعبيرًا عن سلوك الأشياء. فأغلب المواد الصلبة أثقل (وأكثر كثافة) من شكلها السائل؛ ولذا تغوص لأسفل. ولكن لماذا يشذُّ الثلج عن هذه القاعدة، وكيف أثَّر ذلك على تطوُّر الحياة على كوكب الأرض؟

على الرغم من أن الناس قد لاحظوا من قبلُ ما يُطلق عليه أحيانًا «التمدُّد بالبرودة» الذي يحدث للماء عندما يقترب من درجة التجمُّد، فإن أول شخص أجرى دراسة علمية حقيقية لهذه الظاهرة هو بنيامين طومسون، كونت رومفورد، في العَقد الأول من القرن التاسع عشر. كان رومفورد شخصيةً نابضة بالحياة جديرًا بأن يُفرَد له كتاب وحدَه، بدأ حياته باسم بن طومسون في المستعمرات الأمريكية في عام ١٧٥٣، وقاتل في صفوف الجانب الإنجليزي في حرب الاستقلال الأمريكية، وشقَّ طريقه إلى بافاريا (حيث قادته

خدماته الكثيرة للدوق لمنحه لقب الكونت)، وأجرى دراسات رائدة حول طبيعة الحرارة، وأسَّس المعهد الملكي بلندن. وخلال مسيرته العلمية، درسَ ما يحدث للمياه حين تقترب من درجة التجمُّد.



كونت رومفورد. «مجموعة أبيكاسيس/ساينس فوتو لايبراري».

من المعهود بالنسبة إلى شخصٍ مثل رومفورد، الذي لا يتوقف عن العمل مطلقًا، أن يكون بعض هذه الدراسات مدفوعًا بملاحظاتٍ أجراها أثناء قضائه إجازة في جبال الألب السويسرية مع السيدة الجميلة ماري لافوازييه (أرملة الكيميائي الرائد أنطوان لافوازييه) التي تزوجها فيما بعد. فعلى سطح كتلة كبيرة من الثلج فوق جبل شاموني الجليدي، رأى الكونت رومفورد «حفرة أسطوانية الشكل تمامًا، يبلغ قطرها نحو سبع بوصات، وعمقها أكثرَ من أربعة أقدام، مملوءة بالماء عن آخرها.» وبعد أن أخبره مرشدو تسلُّق الجبال بأن مثل هذه الحفر منتشر جدًّا، أخذ يفكِّر في كيفية تكوُّنها. من الممكن أن تكون الرياح الصيفية الدافئة التي تهب على الثلج قد أذابت السطح الثلجي على هيئة منخفضات طبيعية رقيقة. والمياه الموجودة في الجزء العلوي من هذه البِرك أكثر دفئًا قليلًا من المياه الموجودة بالأسفل، ومن ثَم فهي أكثر كثافة فتغوص لأسفل وتمنح حرارتها

للثلج الموجود في قاع البِركة وتذيبه. أما الماء الذي صار الآن أكثر برودة قليلًا، فيكون أخفَّ فيرتفع إلى السطح، ليحل محلَّه الماء الأكثر دفئًا قليلًا الذي يتساقط لأسفل، في مثال متكامل على الانقلاب الحراري الذي «من خلاله يزداد عمق الحفرة باستمرار» حتى يعود الطقس البارد. وقد دوَّن الكونت رومفورد كلَّ هذا في ورقة بحثية نُشرت في دورية «فيلوسفيكال ترانزتكشانز» الصادرة عن الجمعية الملكية في عام ١٨٠٤، حيث أكَّد أن هذه الدراسات:

> لا ينبغي اعتبارها كافية لكي نحدِّد، بدقة بالغة، درجةَ الحرارة التي تصل عندها كثافة المياه إلى الحد الأقصى لها؛ وإنما لإثبات أن درجة الحرارة هذه تفوق درجةَ حرارة ذوبان الثلج بدرجات عديدة على المقياس الحراري.

ولكن بعد مرور عام واحد فقط، قدَّم ورقة بحثية إلى المعهد الوطني الفرنسي يصف فيها تجربة دقيقة حدَّدت بدرجة معقولة من الدقة درجةَ الحرارة التي يصل عندها الماء إلى كثافته القصوى.

ملأ رومفورد حاويةً بثلجٍ على وشْك الذوبان، عند درجة تجمُّد المياه بالضبط. وداخل هذا الحمَّام الثلجي، كانت هناك حاوية أخرى، بداخلها إناء على هيئة كوب، متصل به مقياس حراري. وفوق الكوب مباشرة، كانت توجد كرة ساخنة يمكن غمسها في طبقة الثلج نصف الذائبة من الجزء العلوي بالحمَّام الثلجي، وتدفئة المياه الموجودة هناك. وكما توقَّع رومفورد، كانت المياه الدافئة أكثر كثافة من المياه المثلجة وغاصت إلى قاع الكوب؛ ملأت المياه الأكثر كثافة الكوب، حيث أمكن قياس درجة حرارتها. فوجد أن الكوب يمتلئ بماءٍ تصل درجة حرارته إلى ٤١ درجة فهرنهايت، أو ما يعادل ٥ درجات مئوية (حدَّدت القياسات الحديثة أن المياه تصل إلى أقصى كثافة لها عند درجة حرارة ٤ درجات مئوية؛ ومن ثَم يكون قد أبلى بلاءً حسنًا للغاية في ظل الأدوات المتوافرة لديه آنذاك).

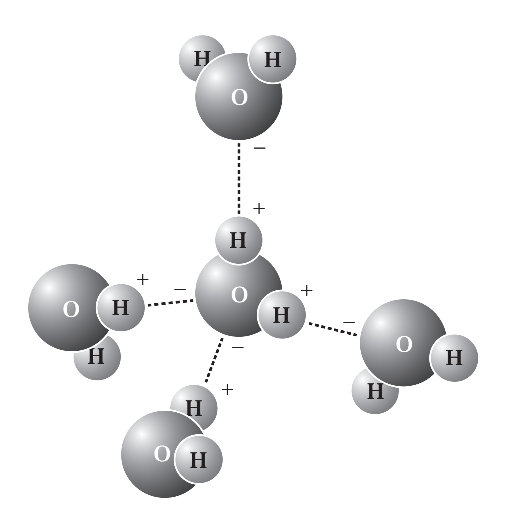
السؤال الذي أثاره هذا الأمر هو: لماذا سلكت المياه هذا السلوك؟ تكمن الإجابة في طبيعة الرابطة الهيدروجينية، التي لم تُفهم الفهْم الصحيح إلا بعد تطوير نظرية الكَمِّ في عشرينيات القرن العشرين، ولكن يمكنك أن تحصل على فكرةٍ تقريبية بوجه عام. تستند هذه النظرية إلى حقيقةِ أن ذرة الهيدروجين هي الأبسط بين جميع العناصر، وبها إلكترون واحد فقط سالب الشحنة يدور بشكلٍ ما حول بروتون أحادي موجب الشحنة.[١] يمكن أن تتَّحد الذرات لتكوِّن جزيئات عندما تشارك الإلكترونات بعضها مع بعض لتكوين رابطة،

وبعض التشكيلات لها تفضيل خاص في قوانين الكَمِّ. على سبيل المثال، ذرة الهيدروجين من شأنها أن «تفضِّل» الاقتران بإلكترونيين، ومن ثم ستتحد بحماس مع أي ذرة أخرى لديها إلكترون متاح للاقتران وتكوين جزيء، مع مشاركة الإلكترونين فيما بينهما. وهذا لا يمكن حدوثه إلا مع عناصرَ معيَّنة، نظرًا إلى الطريقة التي تؤثِّر بها قوانين الكَمِّ على عملية الاقتران. فعلى سبيل المثال، تستطيع ذرات الكربون أن تكوِّن أربعة روابط، وذرات الأكسجين رابطتين، وذرات النيتروجين ثلاثة روابط. ولكن عندما تكوِّن ذرة الهيدروجين رابطة بهذه الطريقة، مع تكوين الإلكترونات ما يشبه الجسر بين بروتون وذرة أخرى، يكون الجانب الآخر من البروتون مكشوفًا، دون ساترٍ يحجُب عنها الشحنة الكهربائية السالبة خارجها. وهذا يعني أنه يمكنها تكوين روابط أضعف مع الذرات التي بها فائض من الشحنة السالبة متاحة لهذا الشكل الأضعف من أشكال الاقتران، بخلاف الإلكترونات المستخدمة في الترابط المعتاد. ولا يحدث هذا إلا مع ذرات الهيدروجين؛ فنويَّات الذرات الأخرى محاطة بحاجز من عدد إضافي من الإلكترونات لا يدخل في عملية الترابط الكيميائي العادية. بيْد أن هذا الفائض من الإلكترونات هو ما يتيح الفرصة لها لتكوين الطرَف الآخر من الروابط الهيدروجينية.

وعلى الرغم من إمكانية تكوين الروابط الهيدروجينية بين الجزيئات الأخرى (خاصة في الحمض النووي، وفي الروابط التي تمنح جزيئات البروتين أشكالها المثيرة والمهمة)، فإن الروابط التي تشتمل على المياه تكون قوية على نحوٍ خاص وذات أهمية خاصة بالنسبة إلينا. فجزيئات الماء تتألَّف من ذرتَي هيدروجين وذرة أكسجين، H_2O. وتحتوي كل نواة أكسجين على ثمانية بروتونات، ومن ثَم توجد ثمانية إلكترونات في السحابة المحيطة بالنواة. يدخل اثنان فقط من هذه الإلكترونات في الروابط التي تنشأ مع ذرات الهيدروجين، وبذلك يكون هناك ستة إلكترونات غير مشتركة بأي رابطة في السحابة. وهذه الأخيرة توفِّر تجاذبًا كهربائيًّا لنواة الهيدروجين المكشوفة جزئيًّا التي تنتمي لجزيئات المياه القريبة.[٢]

يمكن لكل ذرة أكسجين في جزيء الماء أن تكون رابطتين هيدروجينيتين بهذه الطريقة، بينما على الجهة الأخرى من جزيء الماء يمكن لكل ذرة هيدروجين أن تكوِّن رابطة هيدروجينية أحادية مع ذرة أكسجين في جزيء آخر. وينتج عن ذلك في المجمل أربعة احتمالات لتكوين الروابط، وهو ما يحث على تكوين روابط هيدروجينية مرتَّبة في أشكال رباعية حول كل جزيء من جزيئات الماء، مما ينتج عنه البنية البلورية المفتوحة في المواد الصلبة (تخيل ندف الثلج)، كما يحث أيضًا جزيئات الماء على جذب بعضها لبعض

أثناء التحرُّك في سائلٍ ما. ولهذا السبب يكون الماء سائلًا في جميع درجات الحرارة التي نجدها مناسبة على كوكب الأرض اليوم.



الترابط الهيدروجيني لجزيئات الماء.

يتوقَّف وجود المادة في حالة صلبة أم سائلة أم غازية على درجة الحرارة، فيما تتساوى بقية العوامل الأخرى (بالأخص الضغط). فكلما ارتفعت درجة الحرارة، زادت طاقة الجسيمات التي تكوِّن المادة (الذرات أو الجزيئات)، ومن ثَم تزداد السرعة التي تتحرك بها. وعند درجة حرارة عالية بما يكفي، تتحرك الجسيمات دون قيود، متصادمة بعضها ببعض وبجدران أي حاويات تحتويها. أم في نطاق درجات الحرارة المنخفضة، فتكون شبه متلامسة، ولكن يظل لديها الطاقة الكافية للانزلاق بكل سهولة بعضها فوق بعض. وعند درجات الحرارة الأقل، لا تكاد تكون قادرة على التحرك تمامًا، إلا للقيام بنوع من الحركة أشبهَ بالركض في المكان، وتكوِّن مادة صلبة. فالجزيئات الأثقل تحتاج إلى المزيد من الطاقة للتحرك على نحوٍ أسرع؛ لذا يفترض في العموم أن تذوب المواد المكونة من جزيئات أثقل وتتبخر عند درجات حرارة أعلى من المواد المكونة من جزيئات أخف، ويُستثنى من ذلك المواد التي ترتبط فيها الذرات معًا لتكوين بلورات أو غيرها من الأشكال الأخرى، كما هو الحال مع الكربون الصلب مثلًا. ويمكن ملاحظة الطابَع الخاص للماء من

خلال مقارنة سلوكها بسلوك المواد المكونة من جزيئات ذات وزن مقارب لوزن جزيئات الماء أو حتى أعلى.

إذا اعتبرنا أن ذرة الهيدروجين الأحادية تساوي وحدة كتلة واحدة، وأن ذرة الأكسجين تساوي ١٦ وحدة، فإن جزيء أكسجين واحد (H_2O) يزن ١٨ وحدة. ثمة جزيء آخر شائع جدًّا، ألا وهو ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، يتكوَّن من جزيئي أكسجين مرتبطين بذرة كربون واحدة، تزن كتلتها ١٢ وحدة. ومن ثَم، يكون إجمالي الكتلة لجزيء ثاني أكسيد الكربون هو ٤٤ وحدة. غير أن ثاني أكسيد الكربون في درجة حرارة الغرفة يكون في صورة غازية، بينما يكون الماء في صورة سائلة. أما كبريتيد الهيدروجين (كتلته ٣٤)، والميثان (كتلته ١٦) وثاني أكسيد النيتروجين (كتلته ٤٦)، وغيرها من المركَّبات الأخرى، تكون جميعًا في صورة غازية في درجة حرارة الغرفة. وتكون المياه في حالتها السائلة فقط في ظل الظروف الموجودة على سطح كوكب الأرض؛ لأن الروابط الهيدروجينية تجعل جزيئات المياه لزجة. حتى عندما تتحرَّك الجزيئات عندما يكون الماء في حالة غازية ويكون التجاذب بين جزيئات الأكسجين ليس قويًّا بالدرجة الكافية لإبطائها وتكوين الروابط الهيدروجينية الدائمة، فإن تأثير الترابط الهيدروجيني يظل قائمًا. وفي حالة الماء السائل، على الرغم من أن المسافات بين الجزيئات المتجاورة تكون كبيرة بما يكفي وطاقة الجزيئات عالية كفاية لتجعل الروابط الهيدروجينية تتمدَّد وتنكسر أثناء محاولة تكوينها، فإنها تظل تتكوَّن بصفة مؤقتة. وأما في الحالة الغازية، فيكون التأثير أقوى عندما تقترب درجة الحرارة من نقطة الغليان؛ أي ١٠٠ درجة مئوية؛ وفي حالة الماء السائل نفسه، تكون الجزيئات أقرب لبعضها مما لو كان تأثير الترابط الهيدروجيني غائبًا. وعندما تقترب درجة الحرارة إلى نقطة التجمُّد، يكون التأثير كبيرًا جدًّا.

عند درجة حرارة ٤ مئوية، تسير الأمور كما قد تتوقَّع تقريبًا؛ إذ تزداد كثافة الماء عند انخفاض درجة حرارته وتباطؤ حركة جزيئاتها. فعند درجة حرارة ٤ مئوية، يكون الماء أكثر كثافة بنسبة ٤ بالمائة من الماء القريب من درجة الغليان. ولكن عند درجة حرارة أقل من ٤ مئوية، تتحرك الجزيئات على نحوٍ بطيء للغاية لدرجةِ أنها تبدأ في ترتيب نفسها في النمط الرباعي المعهود للثلج. وحتى قبل أن يمكنها تكوين بلورات دائمة، فإن هذا يقلل من كثافة السائل، مثلما لاحظ كونت رومفورد. وعندما يتكوَّن الثلج الصلب بالفعل، يطفو على سطح الماء. ثمة مواد أخرى تُكوِّن وحدات شبكية بلورية فسيحة وتتمدد بالتجمُّد، من بينها حمض الخليك والسيليكون والجاليوم والبلوتونيوم (إذا أردت أن تجازف بتجربته).

غير أن الماء يُعد ذا أهمية بالغة بالنسبة إلى الحياة على سطح كوكب الأرض، وقد تكون خفة الثلج المذهلة سببًا أساسيًّا لوجودنا على سطح هذا الكوكب.

هناك عدة فوائد للترابط الهيدروجيني قد لا تكون واضحة مباشرةً. على سبيل المثال، يتيح الترابط الهيدروجيني للكائنات الحية مثلنا أن تخفض حرارتها من خلال التعرُّق؛ نظرًا إلى أن الأمر يستلزم وجود قدرٍ كبير من الحرارة كي تتكسر الروابط الهيدروجينية بين جزيئات الماء وتبخر الماء (فالطاقة المستخدَمة في تبخُّر العَرق هي التي تساعد في خفض حرارة أجسامنا في الأيام الحارة)، ووجود مسطح مائي كبير قريب يمكنه امتصاص الحرارة عند ارتفاع درجات الحرارة وإخراجها عند انخفاض درجة الحرارة يقلِّل من نطاق التغيرات الحرارية بالقرب من البحر، وهو ما يجعل فصول الصيف باردة نسبيًّا وفصول الشتاء دافئة نسبيًّا. وهذا أمر مناسب جدًّا بالنسبة إلى سكان المناطق الساحلية اليوم. إن تأثير الترابط الهيدروجيني هو ما يتيح وجود مسطحات مائية كبيرة حتى عند انخفاض درجة الحرارة دون درجة التجمُّد؛ لأن وجود طبقة من الثلج على سطح الماء يقوم مقام حجاب عازل يحافظ على الماء تحت طبقة الثلج سائلًا. وبدون هذا التأثير، ربما يتجمَّد الكوكب الذي نعيش عليه، ويتحوَّل إلى كرة ثلج هامدة بلا حياة، استنادًا إلى السجل الجيولوجي.

ولولا وجود الرابطة الهيدروجينية، لَمَا كان هناك وجود للماء السائل على سطح الأرض مطلقًا بالطبع. ولكن تخيَّل للحظة كوكبًا باردًا بدرجة تكفي لوجود ماء سائل على سطحه مع غياب ميزة الترابط الهيدروجيني. ماذا سيحدث لو صار الجو باردًا بالدرجة الكافية لتكوين الثلج؟ سيستقر الثلج في قاع المحيط؛ نظرًا إلى كونه أكثرَ كثافة من الماء السائل. وهذا من شأنه أن يجعل سطح المحيط معرضًا للبرودة؛ ومن ثَم سيتجمَّد المزيد من الماء ويغوص إلى القاع. وسرعان ما سيتحول المحيط بأكمله، أو البحيرة، إلى قطعة صلبة متجمدة. وهذا من شأنه أن يحدث لكل المياه الموجودة على سطح الكوكب. وسيكون من الصعوبة بمكان إذابة مثل هذا الكوكب المتجمِّد؛ لأن السطح الأبيض اللامع للثلج سيشتِّت حرارة الشمس القادمة. وفي ظل هذه الظروف، لا يمكن لأشكال الحياة، مثلنا، أن يكون لها وجود. وحتى في ظل وجود ميزة الترابط الهيدروجيني، شهد كوكب الأرض على مدار تاريخه الطويل حدث «كرة الثلج» أكثر من مرة.

يتبيَّن لنا من الأدلة الجيولوجية المتمثلة في ندوب الصخور ونوعيات الرواسب المترسبة في المحيطات في فترات زمنية متباينة أن كوكب الأرض تجمَّد تمامًا قبل نحو مليارين

ونصف المليار عام مضى، وتجمَّد مرة أخرى في فترة ما بين ٧٠٠ و٦٠٠ مليون عام مضى. ربما كانت هناك أحداث أخرى مشابهة، ولكن لا توجد أدلة قاطعة بشأنها. ولا أحد يعرف ما الذي يؤدي إلى حدوث مثل هذه الأحداث. وتذهب التخمينات إلى وقوع انفجارات بركانية كبيرة على سطح الأرض قذفت موادَّ إلى الغلاف الجوي كانت بمثابة درع واقية للسطح من حرارة الشمس، أو وقوع تصادمات بين المذنبات في الفضاء نشرت غبارًا عبر الجزء الداخلي من المجموعة الشمسية لتصنع حاجزًا واقيًا ضد الشمس. ولكن تتمثل النقطة المهمة في أن مثل هذا التجمُّد الكبير بمجرد أن يحدث، بسبب انعكاسية السطح اللامع للكوكب، سيكون من الصعب أن يحدث معه ذوبان كبير. في الواقع أن الثلج اللامع لا يعكس صورةً جيدة لمظهر الأرض ككرة ثلج. فمن شأنها أن تكون باردة جدًّا لدرجة أن بلورات صغيرة من الثلج ستتكوَّن في الأجواء الجافة وتتساقط على الأرض، حيث ستلمع مثل غبار الماس.

تأتي نهاية هذا الموقف، على نحوٍ شبهِ مؤكَّد، بتراكم لثاني أكسيد الكربون في الهواء، مما يؤدي إلى تدفئة الكوكب عبر تأثير الاحتباس الحراري. وفي ظل الظروف القائمة على سطح كوكب الأرض اليوم، تنبعث الغازات الدفيئة عن طريق البراكين، ولكن ثاني أكسيد الكربون يذوب في الماء الذي ينساب فوق الصخور وعبرها، حيث تأخذ التفاعلات الكيميائية ثاني أكسيد الكربون وتستغله في تكوين صخور مثل الحجر الجيري. وتساعد هذه التجوية في الحفاظ على عنصر التوازن بين الأشياء. فإذا سخَنَ الكوكب قليلًا، ازداد التبخُّر من المحيطات، ومن ثَم يزداد المطر وتزداد التجوية، مما يعمل على سحْب نسبة ثاني أكسيد الكربون من الجو، ومن ثَم يقل تأثير الاحتباس الحراري، وتنخفض درجة حرارة الكوكب. وعندما تنخفض درجة حرارة الكوكب قليلًا، يحدث العكس. إن الأنشطة البشرية في سبيلها إلى الإخلال بهذا التوازن، ولكن بدوننا حافظ هذا التوازن على درجة حرارة كوكب الأرض مستقرة في نطاقٍ ضيِّق نسبيًّا لملايين السنوات، والفضل في ذلك يعود بصورةٍ خاصة إلى الترابط الهيدروجيني الذي يمنح الماء خصائصه الاستثنائية.

أثناء عصور كرة الثلج، تكون الأرض باردة جدًّا، ويكون خط الاستواء بنفس برودة قلب القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) اليوم، لدرجةِ أنه لا يكون هناك أي تجوية من الأساس، بحيث يمكن لثاني أكسيد الكربون أن يتراكم على مدى فترة طويلة جدًّا إلى الحد الذي ترتفع معه درجة الحرارة ويحدث الذوبان. ومع انحسار الثلج، ينكشف السطح

الداكن، ويمتص دفء الشمس، ما يعمل على رفع درجة الحرارة أكثر. بيد أن الجيولوجيين يقدِّرون أن الذوبان الكبير استغرق حتمًا عدة ملايين من السنين كي يكتمل، بعد أن استمرت إحدى مراحل كرة الثلج عشرات الملايين من السنين. وربما يكون هذا الذوبان عاملًا رئيسًا في وجودنا.

يتزامن — إذا كانت هذه هي الكلمة المناسبة لاستخدامها هنا — حدث كرة الثلج قبل ملياري ونصف مليار عام مضى مع واحد من أهم التطورات في تاريخ الحياة على كوكب الأرض. فمع زيادة حرارة الأرض مرة أخرى، أُطلقت كميات ضخمة من الأكسجين في الهواء بفعل الكائنات الأولية التي طوَّرت القدرة على استخدام ثاني أكسيد الكربون كغذاء لها وإطلاق الأكسجين الحر عبر عملية التمثيل الضوئي؛ وهي كائنات وحيدة الخلية تُدعى الزراقم أو البكتيريا الزرقاء. وكانت هذه ميزة تطورية مزدوجة. فقد كان الأكسجين بالنسبة إلى الكائنات الحية السابقة، بمثابة سمٍّ استدعت الضرورة تخزينه في مركَّبات غير ضارة، على حساب الطاقة. ولم تستطِع الأنواع الجديدة أن تتعايش مع الأكسجين وتوفِّر الطاقة فحسب، بل استطاعت أيضًا أن تسمِّم جميعَ منافسيها الآخرين من خلال إطلاق الأكسجين. وكان تأثيرها على البيئة المادية كبيرًا بنفس القدْر. فقد تفاعل الأكسجين الحر في الهواء والمحيطات مع مركبات الحديد ليكوِّن رواسب ضخمة من أكاسيد الحديد رُصدت في الصخور المتناثرة في مختلف أنحاء العالم والمعروفة باسم «تكوينات الحديد الحزامي». ومع ارتفاع درجة الحرارة الأرض بعد الخروج من مرحلة كرة الثلج، ظهر الصدأ أيضًا، بفضل انتشار الكائنات القائمة بالتمثيل الضوئي. أكان من قبيل الصدفة حقًّا أن تحدث نقلة تطورية كبيرة في نفس توقيت ظهور أشكال الحياة من أي مواقع بيئية كُتب لها البقاء فيها أثناء مرحلة كرة الثلج مع ارتفاع درجة حرارة الأرض؟ الإجابة على الأرجح لا، رغم أننا ربما لن نعرف الإجابة على وجه اليقين مطلقًا.

إن لدينا فكرةً أفضلَ بكثير حول الكيفية التي انبثقت بها الحياة عبر الكوكب في نهاية أحدث مرحلة من مراحل كرة الثلج، وأدلة أقوى بكثير على أن ذوبان الثلج قد أعطى دفعة للتطور.

يمكن للإجهاد البيئي أن يعزِّز عملية التطور من خلال محو الأنواع الناجحة والسماح للأنواع الناجية (على افتراض وجودها من الأساس) بالتكيُّف والتطور لتحل محلها. والمثال الكلاسيكي على ذلك هو موت الديناصورات قبل نحو ٦٥ مليون عام مضى، الأمر الذي ترك مواقع بيئية للثدييات لتشغلها وتتكيَّف عليها، وهو ما أدَّى إلى وجودنا في النهاية.

بيْد أن الديناصورات ذاتها كانت موجودة فقط بسببِ ما حدث قبل نحو ٦٠٠ مليون عام مضى.

كان هذا قبل خروج الحياة من البحار وانتقالها إلى اليابسة، ومن ثَم فإن الأنواع التي نجت من فترة كرة الثلج لا بد أنها توطَّنت في أماكن دافئة نادرة، ربما كانت مرتبطة بالمناطق البركانية، حيث وُجِد الماء السائل في بِرك (تذكَّر بِركة داروين الصغيرة الدافئة). كان من ضمن هذه الأنواع الناجية البكتيريا، والكائنات الوحيدة الخلية الأكبر حجمًا مثل الطحالب. وفي وقت قريب من وقت حدوث كل هذا، تطورت أولى الكائنات المتعددة الخلايا، مثل الإسفنج. وهذا بالضبط هو نوعية التطور الذي قد تتوقَّع حدوثه في بحيرة صغيرة دافئة ومعزولة حيث يمكن لكائناتٍ جديدة أن تظهر وتنطلق دون مواجهة خطر الالتهام من قِبل الأعداء. بيد أن الأمور صارت مثيرة حقًّا بعد حدوث الذوبان مباشرة. فقبل نحو ٥٧٠ مليون عام مضى، كان هناك انتشار كبير جدًّا للكائنات المتعددة الخلايا حتى إنها اعتُبرت علامة لبداية حِقبة جديدة من الزمن الجيولوجي، ألا وهي عصر الكامبري. وعادةً ما يُشار إليه بـ «الانفجار الكامبري». في ذلك الوقت، تطوَّرت كائنات حية معقَّدة ذات تنوُّع كبير في المحيطات؛ إذ سمحت الميزات التطورية للكائنات المتعددة الخلايا لها بالانتشار. وقد جمع الجيولوجيون كل شيء قبل العصر الكامبري تحت مسمَّى العصر ما قبل الكامبري؛ وهي فترة تبلغ نحو ٣٫٥ مليارات عام من تاريخ الأرض، وكانت الحياة في أثنائها مُمَثَّلة في الكائنات الوحيدة الخلية فقط. وشهدت الفترة منذ وقوع الانفجار الكامبري، التي قُدِّرت ببضع مئات الملايين من السنين، كلَّ الأشياء المهمة بالنسبة إلى الكائنات المتعددة الخلايا مثلنا، تزامنًا مع خروج الحياة من البحار وانتقالها إلى اليابسة وظهور كائنات متنوعة مثل الديناصورات وأشجار البلوط والنباتات السحلبية ونحن أنفسنا. وكل هذا بدأ حين ارتفعت درجة حرارة الأرض بعد الخروج من حالة كرة الثلج الأخيرة.

هناك رسالتان نخرج بهما من كل هذا. الرسالة الأولى هي أن الترابط الهيدروجيني يُعَد، من منظور بشري، أهمَّ عمود من أعمدة العلم. فهو المسئول عن جزيئات الحياة، وجزيئات ماء الحياة. أما الرسالة الثانية فهي أن الحياة تتأثر تأثرًا كبيرًا بأشياءَ مثل حِقَب كرة الثلج. فبدون حدث كرة الثلج الذي وقع قبل ٧٠٠ إلى ٦٠٠ مليون عام مضى والانفجار الكامبري الذي أعقبه، لَمَا كنَّا هنا الآن. وليس هذا هو المأزق الوحيد في قصة ظهور أشكال الحياة، مثلنا، على كوكب مثل كوكب الأرض.

هوامش

(١) بشكلٍ ما فقط؛ لأن فيزياء الكم تخبِرنا بأن الإلكترونات لا تسلك سلوك الجزيئات الدقيقة نفسه؛ وإنما لها خصائص تشبه خصائص الموجات أيضًا.

(٢) لا يمكن أن تُكوِّن روابط «مناسبة» لأسبابٍ تعود لميكانيكا الكَمِّ تتجاوز نطاق هذا الكتاب.

الخاتمة

المآزق: ربما نكون وحدنا!

ما الذي يمكن أن تخبِرنا به أعمدة العلم السبعة بخصوص موضعنا في هذا الكون؟ إن الخطوات التي أدَّت إلى ظهور الحياة على كوكب الأرض واضحة، وتشير إلى أن الحياة معتادة في هذا الكون. بيْد أن إمكانية وجود أشكال أخرى من الحياة مثلنا، مخلوقات ذكية ذات حضارة تكنولوجية، ليست واضحة كثيرًا. وتُعَد المؤهلات التكنولوجية عنصرًا مهمًّا. فوفقًا لمعاييرَ كثيرة، تُصنَّف الحيتان والدلافين كمخلوقات ذكية مثلنا، ولكن هذه الكائنات لا تصمِّم تلسكوبات راديوية ومرْكبات فضائية، وإذا كنا لنتواصل مع كائنات ذكية أخرى في هذا الكون، فسوف تكون كائنات لديها تلك النوعية من التكنولوجيا. من الآن فصاعدًا، إذا أشرتُ إلى الكائنات الذكية دون ذكْر مؤهلات معينة، فأنا أقصد هذه النوعية من الكائنات الحية. إذن، لماذا «نحن» هنا، بدلًا من أن توجد الدلافين والحيتان، أو الفراشات وأشجار البلوط، أو الديناصورات «وحدها»؟

مع وجود نموذج واحد فقط لكوكبٍ تعيش عليه هذه النوعية من الكائنات الذكية، ليس من الحكمة أن نصدِر تعميمات. ولكني سأفعل ذلك على أي حال. من السمات اللافتة للنظر لوجودنا على هذا الكوكب هي المدة التي استغرقناها للظهور، سواء من حيث عمر الكون ككل أو من حيث عمر كوكب الأرض. لقد تكوَّنت مجموعتنا الشمسية قبل نحو ٤٫٥ مليارات عام مضى؛ أي بعد حوالي ٩ مليارات عام من نشأة الكون من الانفجار العظيم. وثمَّة سببٌ يفسِّر استغراق الشمس وعائلتها من النجوم هذا الزمنَ الطويل حتى تتكوَّن. لقد تكوَّنت النجوم الأولى من الهيدروجين والهليوم فقط، ولم يكن هناك أي رابط بينها

وبين العناصر الثقيلة التي يمكن أن تتكوَّن منها الكواكب. وتحتَّم على أجيال من النجوم أن تقضي دورة حياتها وتنشر العناصر الأثقل عبر الفضاء بين النجمي حتى قبل أن تتراكم النسبة الضئيلة، التي وجدناها في المجموعة الشمسية، في السحابة التي تكوَّنت منها الشمس والكواكب. ويقدِّر علماء الفلك أن هناك «منطقة مجرية صالحة للحياة» استنادًا إلى فهْمهم لطريقة تطوُّر النجوم ورصدهم للجزيرة التي نعيش عليها في الفضاء؛ أي مجرة درب التبانة.

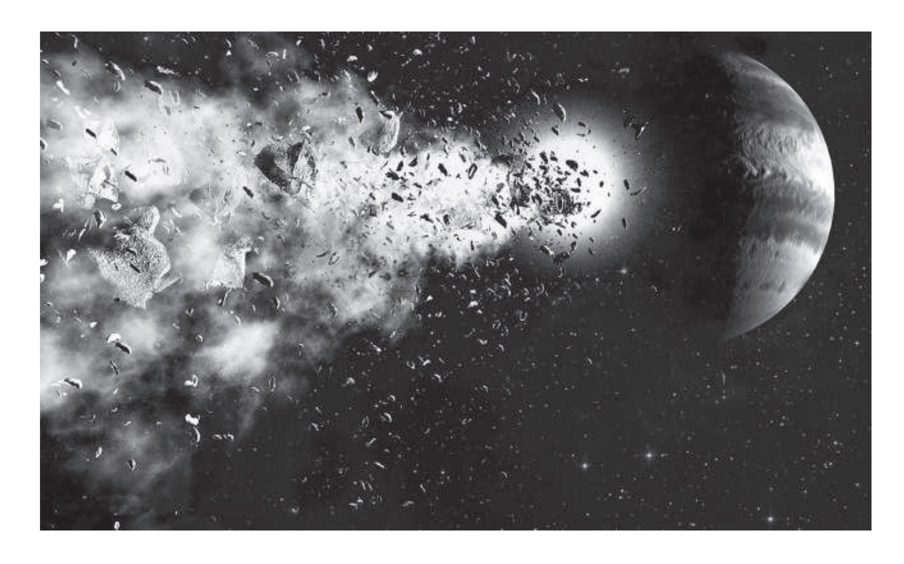
تمثِّل الشمس جزءًا من مجموعة نجوم تأخذ شكل القرص، وهي مجرة درب التبانة، بعرضٍ حوالي مائة ألف سنة ضوئية وسُمك ألف سنة ضوئية. وبالقرب من مركز مجرة درب التبانة، توجد نجوم كثيرة قريبة نسبيًّا بعضها من بعض، بعضها ينفجر مثل المستعرات العظمى أو مستعرات الماكرو. وينتج عن هذا وفرة من العناصر الثقيلة التي تستطيع الكواكب بواسطتها أن تتكوَّن حول أجيال لاحقة من النجوم، إلا أن الإشعاع الصادر عن هذه الانفجارات يشكِّل ضررًا بالغًا على الحياة. وبعيدًا عن مركز المجرة، يوجد عدد أقل من النجوم وفرص أقل لتراكم العناصر الثقيلة. ولكن في نطاق حلقة حول مجرة درب التبانة تبعُد مسافة نحو ٢٦ ألف سنة ضوئية عن مركز المجرة، وقبل حوالي ٥ مليارات عام مضت، تراكمت العناصر الثقيلة بالتركيزات التي نراها في المجموعة الشمسية، واستطاعت نجوم مثل الشمس أن تتكوَّن. فنحن قريبون من مركز هذه المنطقة المجرية الصالحة للحياة.

بمجرد أن تكوَّنت الأرض، كما رأينا، بدأت الحياة بسرعة شبه غاشمة. ولكن لأكثر من ٣ مليارات عام، كانت الحياة تتألف فقط من كائنات وحيدة الخلية تعيش في البحار. وأحد الاستنتاجات المستخلصة من ذلك أن هذه النوعية من الحياة هي التي يرجَّح أن نجدها حتى على الكواكب الشبيهة بكوكب الأرض التي توجد في نطاق منطقتنا الكونية. هل كان ظهور كائنات متعددة الخلايا واستعمار الأرض أمرًا لا مفر منه؟ أم إن الأمر تطلَّب وقوع حدث خاص — مثل حدث كرة الثلج — لتحفيز هذه التطورات؟

مثلما توجد منطقة مجرية صالحة للحياة، توجد أيضًا منطقة نجمية صالحة للحياة، وتُعرَّف بأنها المنطقة المحيطة بنجمٍ ما، حيث يمكن لكائنات حية مثلنا أن توجَد. وأبسط قاعدة بديهية في هذا الإطار أن هذه هي المنطقة التي تتراوح فيها درجة الحرارة على سطح الكوكب بين صفر درجة مئوية و١٠٠ درجة مئوية، وهو النطاق الذي يمكن أن توجَد فيه المياه السائلة بفضل الترابط الهيدروجيني. تقع الأرض تقريبًا في وسط المنطقة

النجمية الصالحة للحياة الخاصة بشمس مجرتنا. فكما أشرتُ في موضعٍ سابق، فإن كوكب الزهرة، ثاني أقرب الكواكب قربًا إلى الشمس، ساخن للغاية؛ رغم أنه لولا ذلك لأصبح أحد أوائل المرشَّحين للقب «الكوكب الشبيه بالأرض». أما كوكب المريخ، ثاني أبعد الكواكب عن الشمس، فهو شديد البرودة اليوم، على الرغم من أنه ربما كان في وقتٍ ما يحظى بغلاف جوي سميك بما يكفي للوصول بدرجة حرارة سطحه إلى النطاق الحرج بفعل تأثير الاحتباس الحراري. ولسوء الحظ، فقدَ معظم ذلك الغلاف، ويُعزى السبب في ذلك جزئيًّا إلى كونه كوكبًا صغيرًا ذا قوة جاذبية ضعيفة. وهذا ما قاد علماء الفلك إلى ابتكار مصطلح آخر من المصطلحات الأثيرة لديهم، وهو مصطلح «منطقة صالحة لاستمرار الحياة». وكوكب الأرض قريب من منتصف المنطقة الصالحة لاستمرار الحياة من الشمس، التي تمتد فقط من مسافةٍ أقرب من المسافة التي تفصلنا عن الشمس بمقدار ٥ بالمائة إلى مسافة أبعد من تلك التي تفصلنا عن الشمس بنسبة ١ بالمائة. النقطة المهمة هنا هي أن أي كوكب يحتاج بالفعل إلى أن يكون صالحًا لاستمرار الحياة، على الأقل لمليارات السنين، ليفرز حضارة تكنولوجية، وذلك من واقع المدة التي استغرقتها الكائنات الذكية مثلنا للظهور على كوكب الأرض. فلو أن ثمَّة كائنات حية على كوكب المريخ، فإنها لم يُتَح لها الوقت مطلقًا لتتطوَّر إلى كائنات ذكية مثلنا. وهذه اعتبارات واقعية تصلح لأن نضعها أمام فيض القصص الإخبارية حول الاكتشافات الجديدة لكواكب تدور حول النجوم الأخرى.

تشير نوعية المدارات التي تدور فيها هذه الكواكب أيضًا إلى أن ثمَّة شيئًا استثنائيًّا بخصوص مجموعتنا الشمسية. إن الكواكب «الخاصة بنا» تدور حول الشمس في مدارات شبه دائرية، وتفصل بينها مسافات كافية حتى إنها لا تؤثِّر بعضها على بعض تأثيرًا كبيرًا. أما في المجموعات الكوكبية الأخرى، فتميل المدارات أكثرَ إلى الشكل البيضاوي، وهذه القاعدة تنطبق بصفة خاصة على الكواكب العملاقة مثل المشتري — أكبر كواكب مجموعتنا الشمسية — التي يسهل دراستها. فمن السهل فهْم كيفية دخول الكواكب إلى مثل هذه المدارات؛ فهذه هي الحالة الطبيعية التي تتكوَّن فيها. ولكن من الصعب فهْم الكيفية التي تُدخل بها كواكب مجموعتنا الشمسية نفسها إلى مدارات دائرية مرتبة، ولا يزال الجدل دائرًا بين علماء الفلك حول ذلك. ولكن الحقيقة الثابتة هي أنها تدور في مدارات منتظمة للغاية. يمكنك أن تتخيل الفوضى التي كان سيتسبَّب فيها المشتري لو أنه يحظى بمدار بيضاوي الشكل على نحوٍ ملحوظ، ما قد يجعله يتحرك في كل مدار من مدارات المجموعة الشمسية نحو الشمس مقتربًا إليها نفس قرب الأرض منها اليوم، قبل أن يعود أدراجه



اصطدام مذنب شوميكر-ليفي ٩ بكوكب المشتري. «شركة ٢٠١٠١٠ المحدودة/ساينس فوتو لايبراري».

مبتعدًا مسافة ابتعاد كوكب زحل عن الشمس اليوم. وهكذا، فمن شأن قوة جاذبيته أن تخلَّ بمدارات أي كواكب داخلية، وهو ما سيجعلها غير صالحة لاستمرار الحياة. على النقيض من ذلك، يبدو للمشتري في مداره الفعلي تأثير حميد؛ إذ يساهم في استقرار المجموعة الشمسية وإبقاء كوكب الأرض صالحًا للحياة.

يحظى كوكب المشتري، الذي تبلغ كتلته أكثر من ٣٠٠ ضعف كتلة كوكب الأرض، بقوة جاذبية شديدة حتى إنه لعب دورًا كبيرًا في تطوُّر المجموعة الشمسية. ففي مرحلة مبكرة، أسهم في زعزعة مدارات أجزاء الحطام الكوني الذي تبقى من عملية تكوين الكواكب التي أسفرت عن القصف الشديد المتأخر الذي ذكرناه في العمود الرابع. وبمجرد التخلص من أغلب الحطام أثناء هذه العملية، جذب كوكب المشتري ما تبقى في مدارات دائرية نسبيًّا بين كوكبي المريخ والمشتري، أي حزام الكويكبات، حيث ظل أغلبه قائمًا هناك. ولكنَّ ثمَّة حطامًا أيضًا، على هيئة موادَّ صخرية مغطَّاة بالثلج، تبقَّت في الجزء الخارجي من المجموعة الشمسية، وراء مدارات الكواكب. وتُعَد هذه المنطقة مصدر المذنبات التي تمر من أمام الكواكب العملاقة إلى الجزء الداخلي من المجموعة الشمسية وتتأرجح أمام الشمس، تاركة أذيالًا لامعة بسبب تبخُّر المادة الجليدية بفعل حرارة الشمس. يحتجز كوكب المشتري الكثير

من هذه الأجرام التي ربما كانت ستمر من أمام كوكب الأرض أو قد تصطدم بكوكبنا لولا احتجازه لها. وأثبت هذا على نحوٍ مذهل في شهر يوليو عام ١٩٩٤، عندما مزَّقت جاذبية كوكب المشتري مذنَّبًا عُرف باسم شوميكر-ليفي ٩ واصطدمت شظاياه بالكوكب العملاق.

ورغم أن كوكب المشتري جرف قدْرًا كبيرًا من هذا الحطام الكوني، فإن بعضًا منه لا يزال ينفذ إلى داخل المجموعة الشمسية. وتكشف الأدلة الجيولوجية أن كوكب الأرض يصطدم بجِرم سماوي لا يقل عرضه عن ١٠ كيلومترات مرة كل مائة مليون سنة أو نحو ذلك. وهذا الاصطدام بنفس حجم الاصطدام الذي وقع لكوكبنا قبل ٦٥ مليون عام مضى وتسبَّب في انقراض هائل للكائنات الحية على كوكب الأرض، بما في ذلك موت الديناصورات. وقد استغرقت الكائنات الشبيهة بالزبابات الناجية من تلك الكارثة كلَّ ذلك الوقت لتطوير حضارتنا التكنولوجية. فبدون كوكب المشتري الذي يحمينا من مثل هذه الأحداث، كان اصطدامٌ كهذا ليحدث كل ١٠ آلاف عام تقريبًا. ولم يكن ليصبح هناك فرصة لتطوير الذكاء في مثل هذه الفترة القصيرة، حتى لو بقيت أي كائنات حية معقَّدة على سطح الأرض على الإطلاق.

ثمَّة تهديدات أيضًا للحياة على كوكب الأرض من داخل كوكبنا، وليس فقط من الخارج. فقبل حوالي ٢٥٠ مليون عام مضى، شهدت الأرض حدثًا بركانيًّا (لا تبدو الكلمة قوية بالدرجة الكافية!) استمر نحو مليون عام ونشر حممًا بركانية شكَّلت طبقة سميكة من الصخور تُعرف باسم مصاطب سيبيريا عبْر ما يُعرف الآن بسيبيريا، كما توقعتَ على الأرجح. تسبَّب هذا الحدث وما ارتبط به من تأثيرات على الغلاف الجوي للكوكب بأسره وعلى مناخه في انقراض للحياة أودى بحياة ٩٠ بالمائة من الأنواع الموجودة في تلك الفترة، ما سطَّر النهاية للعصر البرمي الجيولوجي وكتب بداية العصر الترياسي.

ثمَّة أدلة أيضًا على اندلاع براكين هائلة على نطاقٍ أصغر في الماضي الجيولوجي الأحدث. وتشمل هذه البراكين ذلك البركان الذي أسفر عن تكوين بحيرة توبا، في إندونيسيا، قبل نحو ٧٠ ألف عام مضى. وكان هذا أكبر ثوران معروف خلال الخمسة والعشرين مليون سنة الأخيرة. وقد أسفر عن نشر طبقة من الرماد بعمق حوالي ١٥ سنتيمترًا فوق شبه القارة الهندية بأكملها، ولو صعدت كل تلك الغازات والمواد من ثوران البركان إلى الغلاف الجوي، لكان تأثيرها كبيرًا على المناخ. ومن الواضح أن التغيرات البيئية كان لها تأثير على أجدادنا. فتبيَّن لنا أدلة الحمض النووي أنه في نفس التوقيت الذي ثار فيه بركان إندونيسيا، انخفض تَعداد السكان من البشر على سطح الكرة الأرضية إلى حوالي ألف شخص. والأمر

يستحق التكرار مجددًا. لقد نجا جميع سكان الأرض من البشر، الذين كان عددهم قد لا يتجاوز بضع مئات من الأزواج، من هذه الكارثة فقط في جيبٍ منعزل بشرق أفريقيا. وهذه الأعداد ضئيلة جدًّا لدرجةِ أن أي أنواع موجودة اليوم في ذلك القطاع المعزول من السكان غير المستقر من شأنها أن تُصنف رسميًّا باعتبارها أنواعًا مهدَّدة بالانقراض. لقد نجونا من هذا المأزق بشِقِّ الأنفس.

لعلك ستجد الطمأنينة في حقيقة أن هذا كان بالفعل أكبرَ ثوران بركاني خلال الخمسة والعشرين مليون عام الأخيرة، وأننا قد نجونا بالفعل. وبالتأكيد لن يكون هناك ثوران آخر في القريب العاجل، أليس كذلك؟ ربما عليك أن تفكِّر في ذلك مرة أخرى. فالمنطقة أسفل متنزه ويلوستون بارك بالولايات المتحدة بأكملها تُعرف الآن بأنها بركان هائل مثل هذا البركان في انتظار أن يثور. وسيثور عاجلًا أو آجلًا؛ وليس بإمكاننا سوى أن نأمل أن يكون هذا آجلًا وليس عاجلًا.

الرسالة العامة واضحة. الأرض عُرضة للكوارث المتكررة، بعضها يأتي من الداخل، والبعض الآخر يأتي من الخارج، علمًا بأنني لم أذكر أحداثًا مثل العصور الجليدية «المعتادة». فعلى سطح كوكبنا، كانت هناك فترة زمنية فاصلة بين كل كارثة وأخرى أتاحت ظهور حضارة تكنولوجية، ولكنها فترة قصيرة. وثمَّة بعض الأدلة أيضًا على أن كوكبنا كان محظوظًا بصفة خاصة في هذا الصدد. فالمجموعة الشمسية وُجِدت في المكان المناسب بمجرة التبانة وفي الوقت المناسب لتكوين كواكب مثل كوكب الأرض، والترتيب الاستثنائي للكواكب في مجموعتنا الشمسية، وبالأخص التأثير الإيجابي لكوكب المشتري، جعل الفواصل الزمنية بين الكوارث وبعضها طويلة على نحو استثنائي. هل يعني كل هذا أنه بالرغم من أن وجود الحياة هو شيء معتاد حتمًا في لهذا الكون، فإن الكائنات الذكية مثلنا نادرة وأن برونو كان مخطئًا على أية حال؟ سيكون عليك أن تقرِّر بنفسك، ولكن استنتاجي الشخصي هو أننا وحدنا في هذا الكون على الأرجح.

قراءات إضافية

مراجع سهلة

Richard Feynman, *Six Easy Pieces*, Basic Books, New York, revised edition, 2011.

Steven Weinberg, *The First Three Minutes*, Basic Books, New York, revised edition, 1993.

John Gribbin, *Stardust*, Penguin, London, 2009.

Horace Freeland Judson, *The Eighth Day of Creation*, Cape, London, 1979.

James Lovelock, *Gaia*, Oxford University Press, new edition, 2016.

مراجع متوسطة

Alexander Oparin, *The Origin of Life*, Dover, New York, revised edition, 1953.

Linus Pauling, *The Nature of the Chemical Bond*, Oxford University Press, revised edition, 1960.

Erwin Schrödinger, *What is Life?*, Cambridge University Press, 1944 (reprinted in 1967).

مراجع صعبة

Selected Genetic Papers of J.B.S. Haldane, Routledge, London, reprint of 1990 edition, 2015; also available on Kindle.

مراجع مسلية

Fred Hoyle, *The Black Cloud*, Penguin Classics edition, 2010.


هنـــداوي